



DISEÑO DE EQUIPO ELECTROHILADO POR MÉTODO CENTRIFUGADO PARA POLÍMEROS

Jonathan Vladimir Torres Martínez

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2021

DISEÑO DE EQUIPO ELECTROHILADO POR MÉTODO CENTRIFUGADO PARA POLÍMEROS

Jonathan Vladimir Torres Martínez

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecánico

Directora:

Ing. MsC. Mercy Tatiana Villate Fonseca

Línea de Investigación:

Materiales

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2021

Nota de aceptación

Este trabajo ha sido revisado y analizado encontrándose que reúne los requisitos de elaboración y presentación exigidos por la Universidad Antonio Nariño, por lo cual notificamos su aprobación.

Directora**Mg. Ing. Mercy Tatiana Villate Fonseca**

Jurado 1**Ing.**

Jurado 2**Ing.**

Tunja, Mayo de 2021

Agradecimientos

Primeramente a mi madre, mi padre y a mi hijo, que es el motor en mi vida; a mi familia que fueron mi mayor apoyo y fortaleza en el transcurso de la carrera. A la ingeniera Mercy Tatiana Villate Fonseca, docente de la universidad UAN sede Tunja, que fue mi asesora y guía durante el proyecto de grado; a mi compañero José Santiago Bohórquez que fue un apoyo incondicional como compañero de universidad y como amigo.

Resumen

La técnica del electrohilado por centrifugado, permite emplear el campo eléctrico y la fuerza centrífuga simultáneamente, lo cual conlleva grandes volúmenes de producción de nanofibras poliméricas en menor tiempo y a menor costo; esto abre grandes oportunidades a la industria y las instituciones de investigación, quienes ven una gran opción para desarrollar nuevos procesos tecnológicos y profundizar conocimientos en este tema. Por esta razón, la presente investigación se propuso el diseño de un equipo de electrohilado por centrifugación que combina las características del método convencional con la aplicación de fuerza centrífuga para superar el nivel de productividad. Este proyecto tiene por objeto diseñar un equipo para realizar electrohilado por método centrifugado, de manera que a futuro se puedan hacer comparativos frente a la técnica del electrohilado por método de aguja. Para este logro, se planteó la definición, tanto de parámetros de funcionamiento del equipo, como de componentes eléctricos y mecánicos para el diseño del equipo electrohilado por centrifugado; así mismo, se realizó la simulación del funcionamiento del equipo, con el fin de incrementar su eficiencia con el uso de diferentes fibras y materiales logrando así generar gran variedad de alternativas con las propiedades de las fibras y materiales utilizados. El estudio concluye que los cálculos realizados en el proyecto, tanto en la parte mecánica, como en el campo eléctrico y la simulación, garantizan el funcionamiento adecuado de los engranes y el motor, proporcionando un caudal necesario para evitar taponamientos en el inyector, logrando así un adecuado diseño de las membranas.

Palabras clave: Diseño, electrohilado centrifugación nanofibras, polímeros.

Abstract

The application of the centrifugal electrospinning technique allows the electric field and the centrifugal force to be used simultaneously, achieving a production of polymeric nanofibers in greater volume and less time, making its way both in industry and in research centers. For this reason, the design of a centrifugal electrospinning equipment was proposed that combines the characteristics of the conventional method with the application of centrifugal force to exceed the level of productivity. The aim of this project is to design equipment to perform electrospinning by the centrifugal method, so that in the future comparisons can be made against the technique of electrospinning by the needle method. For this achievement, the definition of both the operating parameters of the equipment, as well as the electrical and mechanical components for the design of the electrospinning equipment was proposed; Likewise, a simulation of the operation of the equipment was carried out, in order to increase its efficiency with the use of different fibers and materials, thus generating a great variety of alternatives with the properties of the fibers and materials used. With the calculations carried out in the project, both in the mechanical part, as in the electric field and the simulation, an adequate operation of the gears and the motor is guaranteed, providing a necessary flow to avoid plugging in the injector, and thus achieve a adequate membrane design.

Keywords: Design, nanofiber centrifugation electrospinning, polymers.

Contenido

	Pág.
Resumen	V
Lista de figuras	IX
Introducción	1
1. Marco Teórico	4
1.1 Estado del Arte	4
1.2 Electrohilado	7
1.3 Técnicas de electrohilado	9
1.3.1 Electrohilado por Inyección de Aguja	9
1.3.2 Electrospinning coaxial	10
1.3.3 Electrohilado de Doble flujo	11
1.3.4 Electrohilado por centrifugado	12
1.4 Equipos de electrohilado por centrifugado	12
1.5 Materiales usados para procesos de electrohilado por centrifugado	14
1.6 Aplicaciones de membranas electrohiladas por centrifugado	16
2. Parámetros para el diseño del equipo electrohilado por centrifugado	19
2.1 Parámetros de funcionamiento del equipo de electrohilado por centrifugado	19
2.1.1 Intensidad del voltaje aplicado	19
2.1.2 Velocidad de alimentación de la disolución	20
2.1.3 Distancia ente electrodos	20
2.1.4 Condiciones Ambientales	20
2.2 Parámetros a considerar en el proceso de electrohilado	21
2.2.1 Peso Molecular y Viscosidad de la disolución	21
2.2.2 Tensión Superficial	22
2.2.3 Conductividad	22
2.2.4 Presión de Vapor	23
3. Diseño y componentes del equipo de electrohilado por centrifugado	24
3.1 Diseño de componentes eléctricos	24
3.1.1 Análisis del sistema eléctrico del equipo	24
3.2 Diseño de componentes mecánicos	25
3.2.1 Análisis del sistema mecánico	25
3.1.5 Análisis de flujo del fluido	30
3.1.6 Análisis de esfuerzo a flexión	31

4. Simulación del funcionamiento del equipo de electrohilado por centrifugado	33
4.1 Modelado de piezas en Inventor.....	33
2.5.1 Eje.....	34
2.5.2 Engranajes	34
2.5.3 Plato dosificador	35
2.5.4 Motor.....	36
2.5.5 Rodamiento	36
2.5.6 Plato colector.....	37
2.5.7 Escobilla	38
2.5.8 Carcasa	39
4.5.9 Bomba inyectora	39
4.2 Ensamble de la máquina	40
4.3 Simulación de esfuerzos.....	43
5. Conclusiones y recomendaciones	47
5.1 Conclusiones.....	47
5.2 Recomendaciones	47
A. Anexo: Planos de piezas de ensamble.....	48
Bibliografía	59

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1: Sistema representativo del electrohilado a) Arreglo típico vertical y b) Arreglo típico horizontal.....	9
Figura 2. Esquema básico del proceso de electrohilado	10
Figura 3: Electrospinning coaxial.....	11
Figura 4. Electrohilado de doble flujo	11
Figura 5. Principio de Hilado por centrifugación	12
Figura 6: Esquema del proceso de hilado por centrifugado	13
Figura 7: Aplicaciones de fibras electrohiladas.....	17
Figura 8: Nanomateriales	18
Figura 9: Motor eléctrico.....	25
Figura 10: Medidas principales engranes	27
Figura 11: Diagrama de fuerzas.....	31
Figura 12: Diagrama de fuerzas 2.....	32
Figura 13: Diagrama cortante.....	32
Figura 14: Diagrama de momento flector.....	32
Figura 15: Esquema centrifugado.	33
Figura 16: Eje engrane	34
Figura 17: Engranes	35
Figura 18: Plato dosificador.....	35
Figura 19: Motor	36
Figura 20: Rodamiento	37
Figura 21: Plato colector.....	38
Figura 22: Escobilla	38
Figura 23: Figura carcasa.....	39
Figura 24: Bomba inyectora	39
Figura 25: Ensamble eje.....	40
Figura 26: Ensamble rodamiento	40
Figura 27: Ensamble motor	41
Figura 28: Ensamble carcasa.....	41
Figura 29: Ensamble escobillas	42
Figura 30: Ensamble plato dosificador.....	42

Figura 31: Ensamble plato colector.....	43
Figura 32: Interfaz de simulación, selección de material.....	44
Figura 33: Interfaz de simulación, asignación del material.....	44
Figura 34: Restricciones en el eje	45
Figura 35: Fuerza radial	45
Figura 36: Simulación esfuerzo a flexión	46
Figura 37: Simulación de deformación en el eje.....	46

Introducción

En los diseños de piezas poliméricas por método centrifugado se han empleado técnicas como la separación de fases, el auto ensamble, la extrusión continua y el electrohilado entre otras. La técnica del electrohilado es la más prometedora y versátil para la producción de redes de nano y microfibras; sin embargo, “la implementación del proceso de electrohilado se encuentra muy limitada especialmente en el sector industrial, principalmente por inconvenientes como la baja tasa de producción y el control de cada uno de los parámetros de operación” (Dávila y Tobacía, 2016)

El electrohilado es una tecnología diseñada para obtener membranas para varias aplicaciones. Se basa en la patente de un aparato del siglo XIX, propuesto para obtener fibras partiendo de la disolución de un polímero en un solvente volátil. Consiste en controlar un flujo de una disolución polimérica sometiéndola a un campo eléctrico, el cual provoca la evaporación del líquido volátil y permite que la sustancia fija adquiera forma de hilos súper delgados, los que se van sobreponiendo sobre una superficie denominada colector de fibras. “Cuando se utiliza la técnica de electrohilado con una disolución de polímero biocompatible y biodegradable, la estructura porosa obtenida tiene potencial aplicación como andamio celular” (Herrero, 2015). En este caso la estructura interna del material se aprovecha como microambiente para procesos celulares biomédica y de alimentos.

En la actualidad se han realizado estudios y avances de investigación en el desarrollo de nano fibras poliméricas combinadas con otros materiales que permiten la modificación de algunas de sus propiedades y nuevos desarrollos para su implementación en varios sectores de la industria como empaque de alimentos, biosensores, medicamentos, envolturas, conservantes, etc. Con el paso del tiempo se vienen realizando nuevos rellenos con metales o fibras, logrando el incremento de propiedades de conductividad térmica y eléctrica, resistencia a la tensión, deformación, propiedades antibacterianas.

Así mismo, dentro de la ingeniería de tejidos, el diseño de un equipo de electrohilado por centrifugado se tiene en cuenta como un proceso muy utilizado para la fabricación de andamios celulares formados por redes de micro y nano fibras poliméricas.

Por lo anterior, es inaplazable la implementación de los procesos de electrohilado, por centrifugado en el sector industrial principalmente, ya que éste se encuentra limitado por dificultades en la baja tasa de producción y el control de los parámetros de operación. Así las cosas, se debe analizar el problema para verificar el proceso actual y tener en cuenta un diseño de equipo que permita la renovación y perfeccionamiento, para generar variedad en las propiedades de los materiales a utilizar y, para innovar con productos de alta calidad y bajo costo a través del diseño de un equipo de electrohilado por centrifugado.

▪ **Justificación**

Con las nuevas aplicaciones del electrohilado, las nano y microfibras poliméricas han provocado gran curiosidad en los investigadores en los últimos años, pues aprovechando sus excelentes propiedades físicas, químicas mecánicas y biológicas, y en razón a su diámetro nanométrico y al perfeccionamiento en su estructura interna; las nano fibras son utilizadas en varias áreas industriales para la producción de sensores, separadores de baterías, transistores, almacenamiento de energía, tecnología de la información, cosméticos y prendas de vestir, entre otros usos. La importancia del diseño de un equipo de electrohilado por centrifugado, radica en la contribución para la preparación de membranas de nano fibras poliméricas con otros materiales que permiten la modificación de algunas de sus propiedades, obteniendo una variada gama de nuevos productos para su implementación en varios sectores de la industria; facilitando así su proceso de producción. Por otro lado, este estudio puede ser utilizado como base para la delineación de futuros proyectos de investigación ante la insuficiencia de diseños de nuevos equipos y procesos de electrohilado.

▪ **Objetivo general**

Realizar el diseño de un equipo electrohilado por método centrifugado para polímeros.

▪ **Objetivos específicos**

- 1) Definir parámetros para el diseño del equipo electrohilado por centrifugado
- 2) Diseñar los componentes eléctricos y mecánicos del equipo

3) Simular el funcionamiento del equipo de electrohilado por centrifugado.

La metodología aplicada para el desarrollo de la investigación se considera de tipo experimental e investigativo, por tener como finalidad la manipulación de variables experimentales bajo condiciones controladas. También posee un perfil exploratorio, por realizarse con el propósito de obtener datos confiables que sirvan como base para estudios futuros. El procedimiento para el diseño del equipo de electrohilado por centrifugado contempla tres fases, las cuales abarcan parámetros de funcionamiento y materiales; diseño y componentes del equipo de centrifugado y el proceso de simulación de esfuerzos realizado en el software Autodesk Inventor 2019.

Alcance

El presente estudio comprende el diseño de un equipo experimental de electrohilado por centrifugado de nano fibras poliméricas, con el fin de generar nuevos conocimientos que permitan perfeccionar los procesos de elaboración de nano fibras poliméricas.

Resultados Esperados

Al culminar el proyecto, se espera contar con el diseño de equipo electrohilado por centrifugado para polímeros que permita según los cálculos realizados determinar que, tanto en la parte de esfuerzo y deformación, como en el campo eléctrico, y en la velocidad de la máquina generar un adecuado diseño de las membranas.

1. Marco Teórico

1.1 Estado del Arte

Cajero, Meléndez, Camacho, Castillo & González (2010) en el estudio “Armazones Celulares por la Técnica de Electrohilado”, hacen una propuesta para el desarrollo de equipos relativamente sencillos de implementar, en instituciones educativas o centros de investigación. Se aplicó la técnica de electrospinning, consistente en que una solución polimérica es forzada a través de una boquilla mediante un campo eléctrico en donde el polímero forma fibras que rápidamente se adelgazan a diámetros más pequeños del orden de nm y μm , La propuesta es construir un equipo que incorpora a la técnica de electrospinning: un dispositivo para un rango de movimiento de 360° ($2\pi\text{rad}$) a lo largo del eje del chorro, un dispositivo para mezclar dos o tres polímeros, y otro dispositivo para variar la distancia entre el electrodo positivo y el electrodo negativo y también una caja que protege al usuario.

Se desarrolló un dispositivo que da un margen de movilidad de 360° a lo largo del eje del chorro, lo que permite una mayor diversidad para obtener arreglos diferentes para las fibras recolectadas, ya sea en dos dimensiones o arreglos tridimensionales, que pueden ser usados en diversas aplicaciones. Por otro lado se crea un dispositivo para variar la posición del electrodo negativo, permitiendo tener diferentes distancias entre los electrodos positivo y negativo pues la separación entre electrodos permite controlar la morfología de las fibras. También se logró desarrollar un dispositivo para electrohilar de dos a tres polímeros diferentes a la vez, de esta manera se pueden mezclar las diferentes propiedades de los polímeros según la necesidad de la aplicación, que en una mezcla común no sería posible. El plato colector intercambiable logrado permite recolectar las fibras en arreglos preferenciales. Y por último se construye una caja de un material no conductor que protege al usuario. Y de una mayor trascendencia se puede observar que

la implementación de estos equipos es relativamente sencilla, y de bajo costo 2,500.00 dólares US aproximadamente, más los materiales que se deseen electrohilar, que resulta insignificante con los beneficios que el equipo traerá a la Institución.

Dávila & Tobacia (2016) en el trabajo de grado titulado «Diseño e implementación de un sistema de control automático para un equipo experimental de electrohilado por centrifugado de nanofibras poliméricas», presentan el diseño e implementación del sistema de control automático para un equipo de electrohilado por centrifugado. Empiezan con la caracterización del proceso de electrohilado, precisando los parámetros y estableciendo las estrategias de control, después a través de la aplicación de teorías para el diseño electromecánico se efectúan los cálculos y modelamientos necesarios para cada uno de los componentes del equipo. Se diseña e implementa una interfaz de usuario que permite determinar valores a cada uno de los parámetros de operación, así como energizar componentes de potencia y dar comienzo o parada al proceso.

La investigación concluye con la puesta en marcha del equipo con el sistema de control implementado, y los resultados de las pruebas de funcionamiento; en las cuales, se evidencia que la mejor calidad de fibras se obtiene a velocidad rotacional de 3000 rpm y tensión entre 10 y 15 kV, con un caudal de inyección de 5 mL/min. Sin embargo, otros investigadores señalan que tanto el diámetro de los agujeros en el dosificador como la velocidad rotacional adecuada depende de algunas propiedades de la solución empleada, como la viscosidad, la tensión superficial y la densidad. Por lo anterior, se recomienda que en futuros proyectos se efectúe el control de otros parámetros del proceso, además de los de operación que se realizaron en esta investigación.

Así mismo, Nieto, Largo & Gómez (2017) en la investigación “Aumento de productividad en la obtención nanofibras poliméricas, mediante validación experimental del proceso de electrohilado por centrifugación” señalan que el desarrollo de nanofibras poliméricas impactan en el sector industrial a través de sus múltiples aplicaciones como materiales compuestos, biomedicina, liberación de fármacos, regeneración de tejidos y fabricación de textiles. Estas fibras pueden obtenerse a través de la técnica de electrohilado y su método de aguja como el más convencional, que a pesar de su versatilidad, tiene como inconveniente la baja productividad (v/t) en la obtención de dichas fibras. Por esta razón se propuso el desarrollo de un equipo de electrohilado por centrifugación que combina las

características del método convencional con la aplicación de fuerza centrífuga, el cual superó su productividad en una relación de 200 a 1. También se validó y comprobó el funcionamiento de la fuerza centrífuga en combinación a los parámetros convencionales de un equipo de electrohilado, así mismo se concluye que la implementación de la fuerza centrífuga y el dosificador rotatorio influyen en el aumento de la producción de nanofibras poliméricas y que controlando la variabilidad de los parámetros determinantes en la producción de las nanofibras se pueden lograr múltiples configuraciones y diámetros de fibras.

En otro estudio realizado por Castro (2018) “Electrohilado coaxial para el desarrollo de membranas a base de poli (acrilonitrilo-butadieno-estireno) y nanopartículas de óxido de zinc: Evaluación de su capacidad para reducción fotocatalítica a Cromo (VI) en agua», se parte del postulado que la elaboración de membranas poliméricas funcionalizadas con nanopartículas de óxidos metálicos es de gran beneficio debido al efecto sinérgico entre ambos componentes, ya que permite la obtención de materiales idóneos que favorecen principalmente su aplicación en el tratamiento de aguas. El propósito de este trabajo de investigación se enfocó en el desarrollo de membranas consistentes en fibras submicrométricas de ABS y nanopartículas de óxido de zinc utilizando como medio de adhesión poliacrilonitrilo, cuya morfología fue lograda a través de la utilización de la técnica de electrohilado coaxial y la combinación de las técnicas electrohiladoimpregnación. En primera instancia, se recurrió a la síntesis de partículas de ZnO con morfología cuasiesférica mediante microondas, que posteriormente fueron incorporadas a ABS/PAN mediante la técnica de electrohilado coaxial y mediante crecimiento hidrotérmicomicroondas. Así mismo, se analizaron las características morfológicas, propiedades químicas, estructurales y térmicas de las membranas fibrosas obtenidas.

Finalmente, se evaluó una de las propiedades que imparte el ZnO, es decir, su actividad fotocatalítica mediante la medición de la eficiencia en la fotoreducción de Cr (VI) en soluciones acuosas. En virtud de que los materiales fibrosos funcionalizados con ZnO obtenidos exhibieron propiedades morfológicas, térmicas y químicas y a su vez promovieron la reducción fotocatalítica de Cr (VI) a Cr (III) hasta en un 81.59%, con una dosis de fotocatalizador del 30% en peso respecto al total de sólidos, se pueden vislumbrar como candidatos potenciales en aplicaciones como filtros en la regeneración de aguas, contribuyendo así parcialmente al desarrollo de tecnologías sustentables.

Por otro lado, en el proyecto de Ruiz (2019) “Diseño y construcción de una máquina de electrohilado vertical de 0 a 15 KV para generar nanofibras con base en el polímero polisiloxano”, se utiliza una fuente de alto voltaje, que genera de 0 a 15 kV para obtener nanofibras con base en el polímero polisiloxano. Para realizar dicha máquina se verificó que la selección de la fuente de alto voltaje sea correcto para que el polímero reaccione y genere la nanofibra, por lo que se ha obtenido la mejor opción de la fuente que posee un rango de 0 a 15 kV, procediendo después a la selección más adecuada de movimiento de la mesa que va a ser la base en donde cae y se deposita la nanofibra, utilizando como accionamiento el aire y un pistón simple efecto, los cuales son accionados electrónicamente por una electroválvula 5/3, lo que permite controlar la carrera del pistón con mayor facilidad posicionándose donde el usuario necesite que este la mesa. Para el sistema de inyección del polímero se utilizó el mismo principio de la mesa, que al ser accionado con aire activa un pistón que presiona una jeringa la cual envía el polímero líquido a través de una manguera, llegando a una aguja y con ello se procedió a realizar la nanofibra. Finalmente, con la nanofibra ya obtenida, se procedió a revisar en el microscopio de barrido el diámetro del hilo que se ha generado, observando un diámetro aproximado de 0,73 μm , obtenido con un voltaje de 13 kV y 10 cm de distancia, demostrando que la máquina genera fibras de acuerdo a sus parámetros utilizados.

1.2 Electrohilado

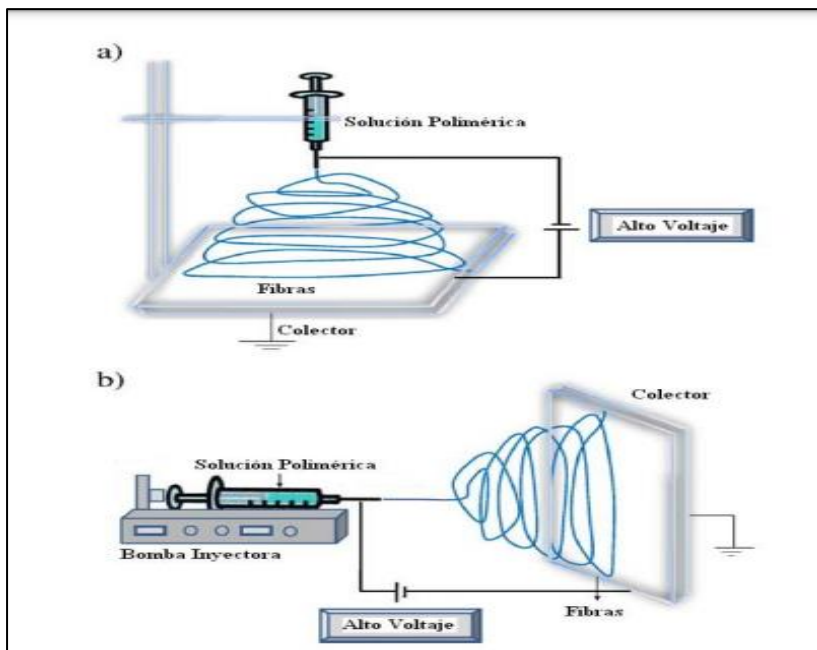
En términos generales, el electrohilado es un proceso sencillo y de bajo costo que produce finas fibras continuas de diámetro submicrónico hasta la escala nanométrica, a través de un jet de carga eléctrica de la solución de polímero constituido por moléculas de cadena lo suficientemente larga. La carga electrostática del líquido en la punta de la aguja, forma una gota conocida como de cono Taylor y cuando se somete a un campo eléctrico fuerte, con un gradiente de campo apropiado, la gota se vuelve inestable, y un jet de fluido único se extrae desde la punta del cono de Taylor. Una vez que el jet fluye fuera del cono de Taylor en casi una línea recta, es sometido a una variedad de fuerzas tanto como la aparición de la inestabilidad y la flexión; mientras tanto, el tramo fuerzas eléctricas interactúa con el jet de proporciones muy grandes, y finalmente se evapora el disolvente y las nanofibras se recogen en el objetivo receptor (Chitral & Shesha, 2009 en Calderón y Martínez, 2012 1-4p.)

Dávila y Tobacía (2016) señalan que el proceso de electrohilado de nano fibras poliméricas se basa en “someter un polímero disuelto en un solvente volátil a un campo eléctrico generado por la aplicación de altas tensiones entre la boquilla de un dosificador y un colector, haciendo que las fuerzas del campo eléctrico superen las fuerzas de la tensión superficial en la solución de polímero cargado, de esta forma a un voltaje determinado, finos chorros de solución son expulsados desde el capilar hacia el plato colector”. Al continuar con el proceso, el chorro corre en la dirección del campo eléctrico, alongándose de acuerdo con las fuerzas externas e internas, seguidamente el disolvente se evapora y los segmentos de fibras son depositados al azar en el colector el cual debe ser construido con lámina de metal conductor eléctrico. Como resultado se obtienen membranas conformadas por redes porosas de fibras superpuestas muy delgadas que facilitan la entrada y salida de fluidos, siendo relevantes para varias aplicaciones como en filtros y en la regeneración de tejidos como andamios celulares.

Por su parte Calderón y Martínez (2012) argumentan que “Electrospinning es una técnica que produce fuerzas electrostáticas para producir fibras finas a partir de soluciones de polímeros o polímero fundido del rango de los nanómetros o micrómetros, y una superficie mayor a la que se ha obtenido en los procesos convencionales de hiladuras. Además es necesario un tensión eléctrica continua (DC) que se encuentre entre el intervalo de los kilovoltios (kV) para llevar a cabo este proceso” (p.41)

Actualmente son dos las configuraciones de Electrospinning estándar, verticales y horizontales, con la expansión de esta tecnología, varios grupos de investigación tienen desarrollado sistemas más sofisticados los cuales pueden fabricar complejas estructuras de nano y micro fibras de una manera más controlada y de una forma más eficiente. Básicamente un sistema de electrospinning consta de tres componentes principales: una alta tensión eléctrica de alimentación, una hilera (una punta de pipeta) y un colector el cual tendrá conectado la tierra a una placa. (Figura 1)

Figura 1: Sistema representativo del electrohilado a) Arreglo típico vertical y b) Arreglo típico horizontal.



Fuente: tomado de Calderón y Martínez (2012)

“El proceso de electrohilado está regido por tres parámetros: parámetros de la solución (concentración, peso molecular, viscosidad, tensión superficial y conductividad), parámetros del proceso (campo eléctrico aplicado, distancia de punta a colector y alimentación o la tasa de flujo) y parámetros ambientales (humedad y temperatura de los alrededores); todo esto determina la morfología y diámetro de las fibras y las características de los productos obtenidos” (Calderón y Martínez, 2012, p.42)

1.3 Técnicas de electrohilado

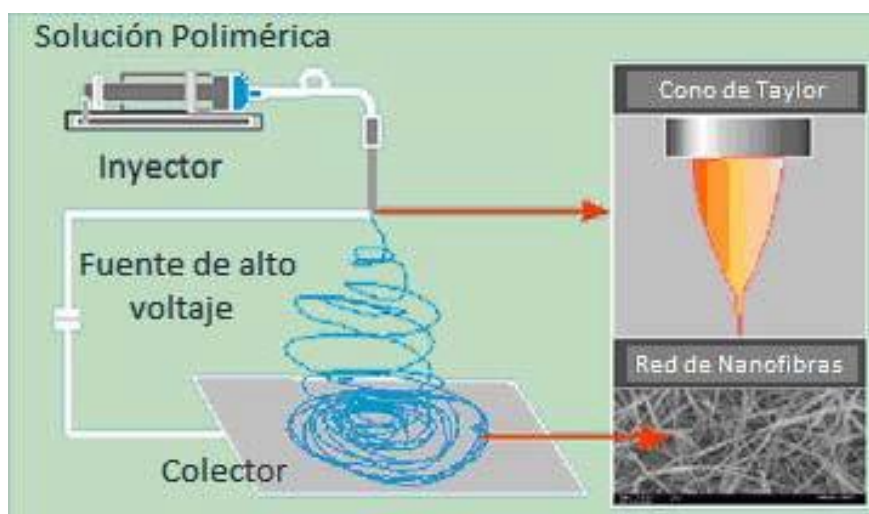
1.3.1 Electrohilado por Inyección de Aguja

Prado (2014) señala que “la técnica tradicional conocida como electrohilado por inyección de aguja, fue patentada por Antonin Formhals en 1934 y que desde entonces ésta ha sido la técnica que se ha empleado para la producción de membranas de nano fibras en todo el mundo; requiriendo de tiempos demasiado largos para la producción de una pequeña membrana de tejido nanométrico”. Sin embargo, recientemente han aparecido diferentes mejoras de ésta, así como ideas de otros tipos de técnicas para la elaboración de nano

fibras poliméricas con el fin de obtener procesos más eficientes acortando los tiempos, y dándole un mayor tamaño a las membranas.

Se encuentran diferentes mecanismos de montaje para realizar la técnica tradicional del electrohilado por inyección de aguja, algunos de éstos trabajan con un colector que funciona como un mandril rotativo tal como puede ser desarrollada tanto de forma horizontal como vertical, “aunque uno de los mayores inconveniente al trabajar en posición vertical es la posible salida de gotas de solución desde el capilar hacia el plato colector debido a los efectos de la gravedad, las cuales pueden caer sobre las fibras depositadas haciendo defectuosa la superficie de las mismas e interrumpiendo el proceso” (Duque, Rodríguez y López, 2013). (Figura 2)

Figura 2. Esquema básico del proceso de electrohilado

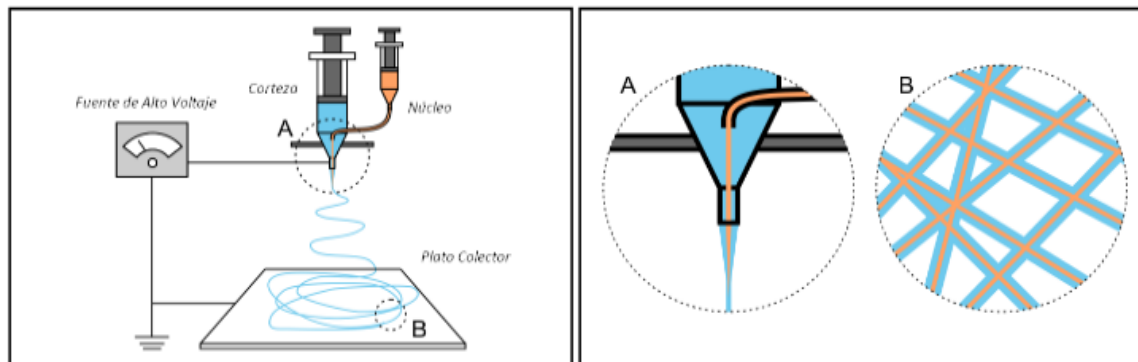


Fuente: Tomado de Gómez, Montiel, Moreno & Vera (2010)

1.3.2 Electrospinning coaxial

Según Duque, Rodríguez & López (2013) algunas de las modificaciones que se han implementado a la técnica tradicional corresponden a los métodos de “Multichannel coaxial electrospinning”, cuyo esquema se muestra en la Figura 3, al método de “múltiple stream electrospinning es decir electrohilado de múltiple flujo; con el cual se obtienen nano fibras empleadas en el vendaje de heridas, básicamente el método consiste en la inyección simultánea de varios tipos de polímeros sometidos a diferentes tensiones.

Figura 3: Electrospinning coaxial

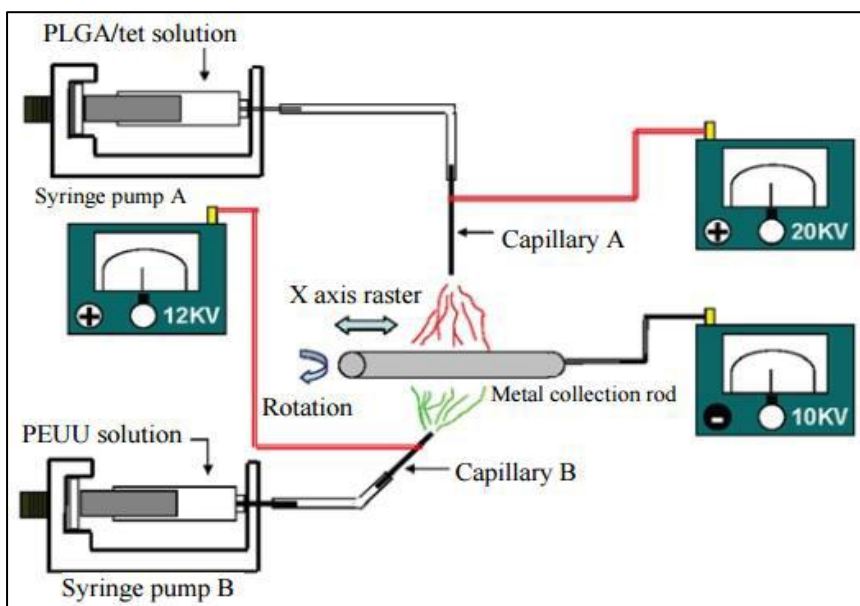


Fuente: Tomado de Duque, Rodríguez & López (2013)

1.3.3 Electrohilado de Doble flujo

Algunas de las modificaciones que se han implementado a la técnica tradicional corresponden al método de “multiple stream electrospinning” es decir electrohilado de múltiple flujo; con el cual se obtienen nanofibras empleadas en el vendaje de heridas. Básicamente el método consiste en la inyección simultánea de varios tipos de polímeros sometidos a diferentes tensiones (Figura 4).

Figura 4. Electrohilado de doble flujo



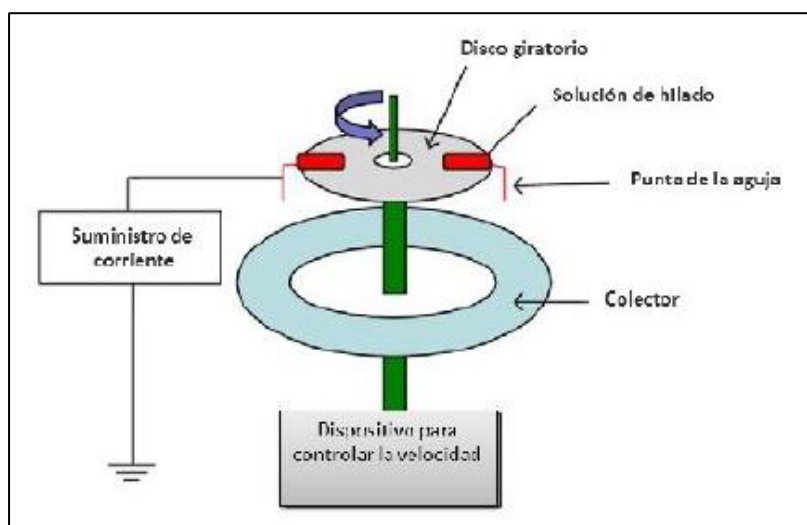
Fuente: Tomado de Dávila & Tobacía (2016)

Además de las técnicas con modificaciones al método de electrohilado por inyección de aguja “hay otros métodos en fase experimental que dan a conocer un aumento significativo en la velocidad del tejido, en el rendimiento y en la calidad de producción, lo cual está relacionado con la obtención de fibras más alineadas y con menores diámetros, algunas de éstas técnicas desarrolladas basadas en el needlesh electrospinning (electrohilado sin aguja) son: el ball spinning (hilado por esferas), el electrohilado con campos magnéticos y el centrifugal spinning (hilado por centrifugado)” (Nanofiber Electrospinning, s.f)

1.3.4 Electrohilado por centrifugado

Esta técnica brinda una tasa de producción mayor, menores costos y en ocasiones no se emplean disolventes en el proceso; se basa en la obtención de micro y nanofibras a través de fuerza centrífuga. Esto permite eliminar y/o minimizar muchas de las limitaciones que se han encontrado al trabajar con la técnica de electrohilado normal (Figura 3)

Figura 5. Principio de Hilado por centrifugación



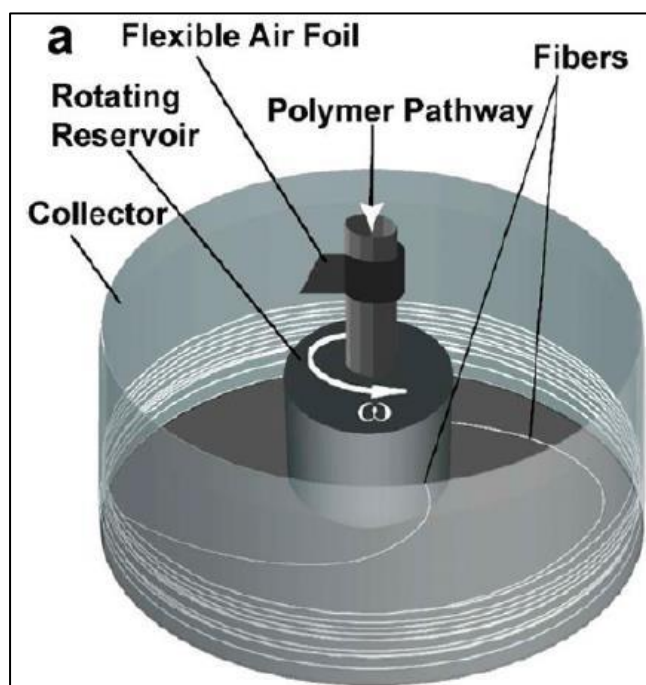
Fuente: tomado de Can Herrera (2017)

1.4 Equipos de electrohilado por centrifugado

El electrohilado por centrifugado “se diferencia esencialmente en la forma y funcionamiento del sistema de inyección, el cual consiste en un plato dosificador con algunas cavidades micrométricas por las cuales arroja la solución polimérica por medio de la fuerza de centrifugado a la que se somete, puesto que dicho dosificador está acoplado

al eje de un motor DC que gira a velocidades entre 900 y 7000 rpm. “Una vez que la solución sale del dosificador se forman hilos que son atraídos hacia el colector gracias a la presencia del campo eléctrico presente al conectar tanto al dosificador (por medio de un sistema de escobillas) como el colector a cada terminal de una fuente de tensión DC variable entre 5 y 25” (Dávila y Tobacía, 2016) Dadas algunas investigaciones en lo correspondiente a la optimización del proceso de obtención de nano fibras poliméricas, ya que para la obtención de una membrana de nano fibras de 50 micras de espesor y 100 cm² demanda hasta 32 horas de trabajo continuo de un equipo de electrohilado por aguja, se llegó al desarrollo de la técnica de electrohilado por centrifugación, mediante la cual se pueden obtener membranas o andamios se similares características a los obtenidos mediante el proceso de electrohilado convencional, en un menor tiempo de trabajo. En este desarrollo tecnológico se propuso que al aumentar el número de capilares y a la vez someter el polímero al fenómeno de centrifugación dentro del dispositivo dosificador, probablemente se obtendría mayor aumento en la producción de nano fibras por unidad de tiempo (Electrohilado por centrifugado, s.f.).

Figura 6: Esquema del proceso de hilado por centrifugado



Fuente: tomado de Dávila & Tobacía (2016).

1.5 Materiales usados para procesos de electrohilado por centrifugado

En los procesos de electrohilado se emplean principalmente dos clases diferentes de materiales poliméricos en la preparación de las estructuras: los naturales y los sintéticos. Los polímeros naturales ofrecen la ventaja de una excelente biocompatibilidad con el cuerpo humano, se usan el colágeno, el ácido hialurónico (HA), la gelatina, el quitosano y la seda. Por otro lado los polímeros sintéticos más utilizados son el policaprolactona (PCL), el poliácido láctico (PLA), poliácido glicólico (PGA) y el copolímero poli (ácido láctico-co-glicólico) PLGA, tienen la característica de ser biodegradables y son preferidos porque evitan una segunda cirugía para eliminar dicho soporte. Entre estos, La PCL es un polímero sintético, biocompatible, bioabsorbible que presenta propiedades mecánicas adecuadas para variedad de aplicaciones, como el uso clínico en dispositivos de liberación controlada de fármacos y también como material de sutura utilizado desde 1980 (Can, 2017).

Otro polímero, el polisiloxano, también conocido como silicona, está construido por cadenas alternadas de oxígeno y silicio adicional a grupos orgánicos laterales, es considerado como un biomaterial que fue considerado como uno de los primeros polímeros inorgánicos que se han desarrollado, que poseen una diversidad de aplicaciones debido a las propiedades físico – químicas, eléctricas, mecánicas (es un polímero elastómero) y biocompatibilidad. Dicho polímero comprende de una gran familia de resinas, aceites y gomas. Para el área biomédica el polímero que más destaca es el polidimetilsiloxano (PDMS), por lo que es un material termoestable, inodoro el cual impide el crecimiento de bacterias, teniendo como característica la resistencia a la corrosión de la sangre y permeable al oxígeno.

El uso de este polímero puede ser tal que, al ser entrecruzado de tal manera que sus propiedades puedan reproducir tejidos suaves como en la aplicación de implantes mamarios, maxilofaciales, catéteres, e incluso puede servir para fabricar articulaciones, bombas de sangre y marcapasos. (Ruiz, 2019)

Otro polímero biodegradable, el PLA, con la cualidad de ser elaborado a partir de recursos renovables como el maíz, la remolacha, el trigo y productos ricos en almidón, lo hace diferente de otros plásticos y además es fácil de adquirirlo, por lo que hoy en día es muy

utilizado como material de empaque de frutas, verduras, pasteles y muchos otros productos de belleza, de tal manera que es de uso común para la mayoría de las personas. Una de las limitaciones del PLA como material de empaque es su baja temperatura de distorsión porque puede deformarse cuando es expuesto al calentamiento durante el llenado, transporte o almacenamiento. También se le atribuyen propiedades como suavidad, resistencia al rayado y al desgaste (Castillo, 2017)

Por otro lado, los polímeros naturales normalmente presentan mejor biocompatibilidad y baja inmunogenicidad, en comparación con los polímeros sintéticos para ser aplicados en áreas biomédicas principalmente. Otra razón importante para utilizar polímeros naturales es su capacidad intrínseca para vincular células, ya que poseen secuencias específicas de proteínas. Además, los andamios hechos de proteínas prometen mejor desempeño clínico.

En investigaciones recientes se ha reportado el uso de polímeros naturales en la preparación por electrohilado de membranas con proteínas, principalmente con colágeno, quitosano, caseína, gelatina, elastina, quitina, acetato de celulosa, y fibroína de seda. Sin embargo, los polímeros naturales presentan la desventaja de su desnaturalización bajo determinadas condiciones. También es importante mencionar que los polímeros sintéticos ofrecen muchas ventajas que los polímeros naturales no poseen, tales como buenas propiedades mecánicas y un tiempo de degradación deseable. (Técnicas de electrohilado, s.f.)

El colágeno es un biopolímero prominente usado extensivamente debido a sus excelentes propiedades biológicas y fisicoquímicas para aplicaciones de ingeniería de tejidos. Los colágenos que generalmente han sido atractivos para los investigadores en la preparación de andamios son los tipos I, III y IV. El colágeno tipo I consiste en dos cadenas $\alpha 1$ y una cadena $\alpha 2$, formando fibrillas de 50 nm de diámetro. El tipo I está presente en huesos, piel, dentina, córnea, vasos sanguíneos, fibrocartílagos y tendones. El colágeno tipo III, presente tanto en la piel como en ligamentos, vasos sanguíneos y órganos internos; se compone en tres cadenas $\alpha 1$ (III) resultando fibrillas con diámetros entre 30 y 130 nm. El colágeno tipo III también contribuye a la flexibilidad de los vasos sanguíneos y se expresa durante el periodo inicial de cicatrización de una herida. El colágeno tipo IV, que es uno de los principales elementos estructurales de la lámina basal y las membranas basales, es un colágeno no fibrilar. Este tipo de colágeno se asocia con colágenos fibrilares para formar microfibrillas y estructuras en red.

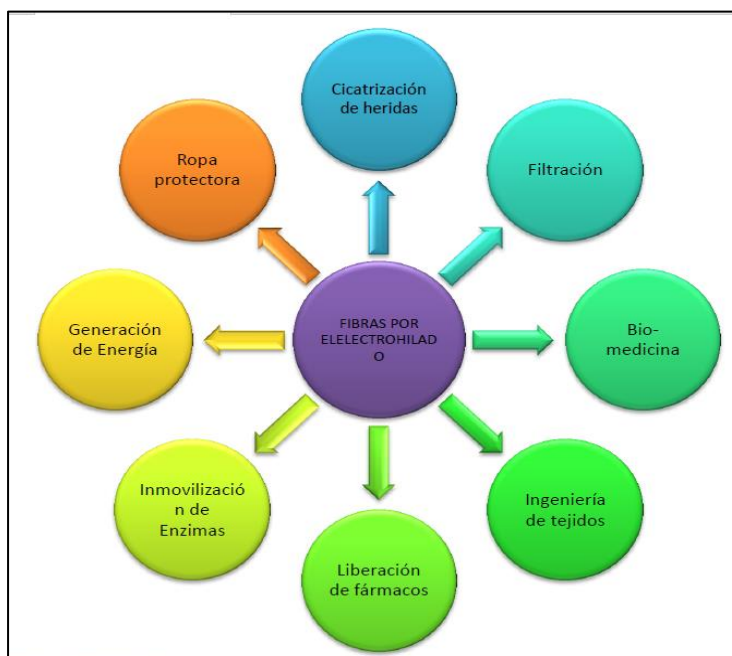
El colágeno se ha empleado en una variedad de aplicaciones en ingeniería de tejidos ya que predomina en la matriz extracelular, inmunogenicidad nula y diversos métodos existentes para aislarlo a partir de una variedad de fuentes. Sin embargo, los procedimientos típicos utilizados para aislar el colágeno y procesarlo en un material ingenieril pueden modificar muchas de sus propiedades estructurales y biológicas. Las fibras de colágeno también poseen algunas propiedades estructurales únicas muy importantes en la ingeniería de tejidos, tales como: transmiten fuerzas, disipan energía, previenen fallas mecánicas prematuras y proporcionan señales biológicas a las células adyacentes para la regulación de respuestas funcionales. Adicional a lo anterior, el colágeno es reabsorbible, tiene alta afinidad por el agua, baja antigenicidad, muy buena compatibilidad con las células y la capacidad de promover la regeneración celular. Estos factores combinados hacen del colágeno un biopolímero ideal para su aplicación en ingeniería de tejidos.

1.6 Aplicaciones de membranas electrohiladas por centrifugado

Recientemente las aplicaciones que se les han dado a las fibras y matrices preparadas por electrohilado han sido muy diversas debido a que proporcionan diferentes ventajas como una muy alta porosidad, cociente superficie y volumen alto, mejoradas propiedades físico-mecánicas, con respecto a fibras formadas por otros métodos, ya que es posible manipular diversos parámetros del proceso para obtener la morfología y fuerza mecánica deseadas.

Las fibras electrohiladas son ampliamente aplicadas en biomedicina como andamios para ingeniería de tejidos, en curación de heridas, liberación de fármacos, filtración, membranas de afinidad, inmovilización de enzimas, implantes vasculares de injerto de diámetros menores, cuidados para la salud, biotecnología, ingeniería ambiental, defensa y seguridad, generación y almacenamiento de energía, y otras. En la Figura 7 se resumen las aplicaciones más comunes del electrohilado.

Figura 7: Aplicaciones de fibras electrohiladas



Fuente: tomado de Dávila & Tobacía (2016)

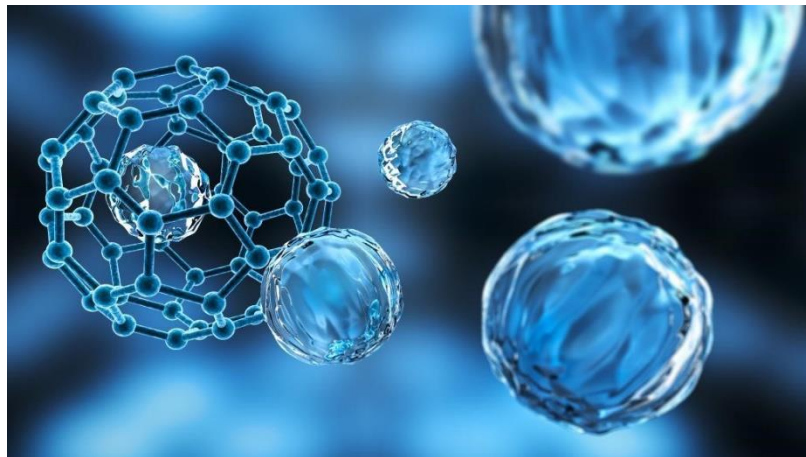
Por otro lado, la creación de nanofibras por el proceso de electrohilado permiten su utilización en el campo biomédico por medio de la adición de nutrientes para tejidos en crecimientos, incrementando con ello las ventajas de su utilidad en ingeniería en tejidos. De la misma manera se conoce que las nanofibras han sido utilizadas en el tratamiento de diversas enfermedades, por ejemplo se pueden usar para hacer tratamientos contra el cáncer al ser aplicadas en dos áreas, la primera es el desarrollo de nanoconectores, estas son nanopartículas a las cuales se les puede adicionar algún tipo de fármaco o a su vez agentes de formación de imágenes y para poder dirigirlos a los tumores, la segunda área es la elaboración de nanosensores que tengan un alto rendimiento para detectar la existencia de huellas biológicas de cáncer. Así mismo existe otro uso de las nanofibras dentro del área biomédica que se enfoca en la creación de nanoestructuras con el fin de construir bloques de ADN, las cuales pueden ser controladas, por ejemplo se tiene las nanopartículas de oro y otra de plata que han sido utilizadas para poder monitorear la hibridación del ADN en un tiempo preciso y real (Ruiz, 2016)

El incremento rápido de microorganismos puede ser causante del rápido deterioro de las fibras, por esta razón el aplicar nanofibras inorgánicas junto a sus nanocompuestos puede ser una gran alternativa, por ejemplo en la industria textil se usan las nanofibras de dióxido

de titanio, puesto que las partículas contienen propiedades únicas que pueden ser utilizadas en auto limpieza, agentes antibacterianos, incluso en agentes que protejan de la luz ultravioleta. Por esto se han generado nanofibras con poliamida 6 (PA6) junto con ZnO y polipropileno incluyendo nanopartículas de ZnO, con el fin de inhibir el aumento bacteriano que ocurre en la superficie de los textiles. De igual forma, las nanofibras son empleadas “aprovechando sus excelentes propiedades físicas, químicas mecánicas y biológicas, y debido a su diámetro nanométrico y al perfeccionamiento en su estructura interna, se fabrican sensores, separadores de baterías, transistores, almacenamiento de energía, tecnología de la información, cosméticos, prendas de vestir, etc.” (Ruíz, 2016)

La nanotecnología también aporta con los nanomateriales, que se utilizan en campos como el sanitario, la electrónica y la cosmética, entre otros. “Sus propiedades físicas y químicas suelen diferir de las de otros materiales a granel, por lo que requieren una evaluación de riesgos especializada” (Zhao, Cao, & Jiang, 2007) (Figura 8).

Figura 8: Nanomateriales



Fuente: Kumar, A. (2010)

2. Parámetros para el diseño del equipo electrohilado por centrifugado

El procedimiento para el diseño del equipo de electrohilado por centrifugado contempla las siguientes fases, las cuales permiten el desarrollo de los objetivos planteados. Dichas fases son:

Fase 1: Establecimiento de parámetros de funcionamiento y de materiales a tener en cuenta para el diseño del equipo de electrohilado por centrifugado para polímeros.

Fase 2: Diseño y componentes del equipo de electrohilado por centrifugado y

Fase 3: Simulación del funcionamiento del equipo, realizado en el software Autodesk Inventor 2019.

2.1 Parámetros de funcionamiento del equipo de electrohilado por centrifugado

2.1.1 Intensidad del voltaje aplicado.

La aplicación de alto voltaje a la disolución es indispensable para superar la tensión superficial de la misma, dotarla de carga y establecer un campo eléctrico entre los dos electrodos. La intensidad de voltaje a aplicar es específica en cada caso, existe una intensidad óptima que produce las nanofibras con las dimensiones y morfología buscadas. Cuanto más alta la intensidad del voltaje, menor es el diámetro de las fibras obtenidas, no obstante cabe resaltar que un exceso de intensidad en el voltaje aplicado, también es la causa de formación de chispas eléctricas, que van a provocar la aparición de macroagregado de polímero en la placa colectora, dando lugar a la aparición de importantes defectos y la pérdida de todas las propiedades técnicas en la zona de

recubrimiento formado. Otra de las propiedades que se ve modificada en función de la intensidad del voltaje aplicado es la cristalinidad de la nanofibra polimérica obtenida, el campo electrostático provoca ordenación de las moléculas del polímero durante el proceso de electrohilado, induciendo un mayor grado de cristalinidad, sin embargo, el aplicar una intensidad de voltaje demasiado alta puede llegar a provocar el efecto contrario. El aumento de la intensidad del voltaje acelera el proceso de formación de las nanofibras, por lo que al depositarse en forma de velo sobre la superficie de la placa colectora, deben tener el tiempo necesario para que se alineen ellas mismas. (Ruiz, 2016)

2.1.2 Velocidad de alimentación de la disolución.

La cantidad de disolución disponible para el proceso de electrohilado por unidad de tiempo es lo que conocemos como velocidad de alimentación. Para un voltaje determinado, existe una velocidad de alimentación óptima si se quiere garantizar la estabilidad del cono de Taylor. Cuando la velocidad de alimentación crece, hay un aumento evidente de la cantidad de disolución, que se traduce en un aumento del diámetro de fibras y de la formación de gotas. Si la velocidad es alta, el chorro encontrará muchos problemas para evaporarse. Por lo tanto, el disolvente que acarrea cada fibra, no tiene tiempo de evaporarse y se deposita sobre el colector de forma amalgamada y fusionada. Las velocidades de alimentación bajas son más deseables porque proporcionan más tiempo para que se evaporen los disolventes. (Deitzel, Kleinmeyer, Harris, & Tan, 2001)

2.1.3 Distancia entre electrodos.

La separación entre electrodos debe ser lo suficientemente corta como para generar corriente entre ambos y permitir que las fibras se depositen en la placa colectora, pero al mismo tiempo deben estar lo suficientemente separados, para permitir la evaporación del disolvente y la formación de fibras con una longitud que se considere aceptable. Cuando la distancia entre electrodos es demasiado corta, el exceso de disolvente no evaporado es la causa de un velo con una estructura amalgamada, en el que las fibras se fusionan unas entre otras. (Ruiz, 2016)

2.1.4 Condiciones Ambientales

Cualquier interacción entre el ambiente y la disolución del polímero o entre el ambiente y el campo electrostático, puede ser causa de un cambio en la morfología de los filamentos

poliméricos. Algunos agentes externos por los que se puede ver alterado el proceso de electrohiladura son el polvo; la temperatura que afecta la viscosidad de la disolución y a la proporción del disolvente evaporado, por lo que un aumento de la temperatura permitirá acelerar el proceso de producción de fibras y, la humedad, que en el caso de trabajar con disoluciones en base acuosa, es recomendable mantener un grado de humedad constante para favorecer la formación de fibras. La humedad relativa no debe ser nunca inferior al 30%, ni superior al 50%. Sin embargo cuando se trabaja con disolventes volátiles la presencia de humedad en el interior de la cámara de electrohilado no resulta ventajosa, hasta el punto de que en algunos casos, es necesario incorporar en el interior de la cámara una corriente de aire seco para disminuir dicha humedad (Ruiz, 2016)

2.2 Parámetros a considerar en el proceso de electrohilado

En el proceso de electrohiladura intervienen una serie de variables, las cuales deben ser en primera instancia estudiadas con detalle y seguidamente determinadas y optimizadas para cada polímero. Al hacer referencia a la química de los polímeros, es necesario disolver el polímero, para obtener nanofibras de este mismo. El proceso de disolución del polímero conlleva el registro de la temperatura de disolución, la adición de cargas, la presión de vapor del disolvente, la concentración del polímero, la viscosidad, la tensión superficial, la constante dieléctrica y conductividades resultantes, centrándose especialmente en la viscosidad, la tensión, y la conductividad eléctrica. (Huang, Zhang, Kotaki & Ramakrishna, 2003)

2.2.1 Peso Molecular y Viscosidad de la disolución.

El peso molecular de los polímeros está en función de la longitud de la cadena polimérica, ya que es la suma de los pesos moleculares de los monómeros que lo conforman, y afecta directamente a la viscosidad de la disolución resultante. Generalmente al tratarse de un mismo polímero, cuanto más alto sea el peso molecular del polímero, mayor será la viscosidad de la disolución. Otra manera de aumentar la viscosidad de la disolución es aumentar la concentración del polímero. Viscosidades altas en la disolución, suponen una mayor interacción entre las moléculas del polímero y las del disolvente, por lo que las moléculas del disolvente se distribuyen enmarañadamente junto con las del polímero. Sin

embargo cuando la viscosidad es baja, las moléculas del disolvente tienden a congregarse bajo la acción de la tensión superficial.

2.2.2 Tensión Superficial.

Cuando una gota cae en el aire generalmente adopta una forma esférica, las propiedades superficiales del líquido que provocan este fenómeno es lo que se conoce como tensión superficial de un líquido. “Ésta tiene como principal efecto la tendencia del líquido a disminuir en lo posible su superficie para un volumen dado, de aquí que un líquido en ausencia de gravedad adopte la forma esférica, que es la que tiene menor relación área/volumen. Energéticamente, las moléculas situadas en la superficie tienen una mayor energía promedio que las situadas en el interior, por lo tanto la tendencia del sistema será a disminuir la energía total, y ello se logra disminuyendo el número de moléculas situadas en la superficie, a ahí la reducción de área hasta el mínimo posible” (Calderón y Martínez, 2012). En el proceso de electrohilado, las cargas de la solución del polímero deben ser lo suficientemente altas como para vencer la tensión superficial de la misma. Cuando la disolución se carga eléctricamente y es acelerada hacia la placa colectora, la fibra debe fluir de forma continua, sin embargo la tensión superficial de la disolución puede ser responsable de desintegrarla en pequeñas gotas, provocando el fenómeno de electro-sprayado en vez de la electrohiladura, también puede ser responsable de la formación de defectos en forma de anillos en las nanofibras obtenidas.

2.2.3 Conductividad.

La electrohiladura está muy relacionada con la repulsión entre cargas que se crea en la superficie de la disolución. A mayor conductividad de la disolución del polímero, mayor facilidad tendrá para cargarse y formar finas fibras de polímero. Además la adición de sales y polielectrolitos facilitaran paralelamente el estirado de la nanofibra durante su formación. Otro de los factores que se ven favorecidos directamente en el proceso de electrohiladura, como consecuencia de un aumento de la conductividad de la disolución, es que el voltaje crítico, para que tenga lugar la formación de nanofibras, se ve reducido notablemente. No obstante, también es necesario señalar que, el aumento de la conductividad en la disolución mediante la adición de iones, puede ser la causa de un aumento de la viscosidad a niveles no deseados.

2.2.4 Presión de Vapor.

La presión de vapor o presión de saturación en la temperatura dada, es aquella en la que la fase líquida y la fase vapor se encuentran en equilibrio dinámico. Este parámetro es el responsable de que el disolvente que forma parte de la disolución precursora, se evapore rápidamente si bien, dejando el tiempo necesario para dar lugar a la formación de los filamentos de polímero.

3. Diseño y componentes del equipo de electrohilado por centrifugado

3.1 Diseño de componentes eléctricos

3.1.1 Análisis del sistema eléctrico del equipo

Una parte fundamental en el proceso de electrohilado es el campo eléctrico aplicado a la solución, permitiendo esto la formación de los hilos de diámetro nanométricos que se depositan en el plato colector. Por esto se calculó las propiedades eléctricas que se generarán en la máquina tales como campos eléctricos, voltaje y aceleración. La distancia entre el plato dosificador y el plato colector será de 15 cm., ya que según varios autores determinan, que es la distancia indicada para la formación de una fibra de calidad (Chen, Zheng, Hsu, & Chung, 2019)

$$E = \frac{v_a - v_b}{d} = \frac{10000v}{0,15m} = 66666,7 \frac{N}{c} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$a_c = \frac{eE}{m} = \frac{1,6 * 10^{-19}c(66666,7 N/c)}{9,11 * 10^{-31}kg} = 1170,8 * 10^{13} \frac{m}{s} \quad (\text{Ec. 2})$$

Se evidencia que la partícula estará sometida a una aceleración elevada, esto permitirá que al momento del inicio del recorrido de la aguja al plato se genere un mayor estiramiento de la solución, a su vez en el proceso de ramificación donde se generan los distintos hilos se obtendrán hilos más delgados.

Debido a que en la mezcla no solo actúa la velocidad generada por el campo eléctrico sino también la generada por el movimiento angular del plato dosificador, se hace necesarios

cálculos de la velocidad tangencial con la que se deja el plato colector. Otro factor importante es el caudal expulsado por los agujeros del plato, ya que se desea que la salida del hilo sea constante para producir un mejor proceso en la separación de las fibras (Reneker & Chun, 1996)

3.2 Diseño de componentes mecánicos

3.2.1 Análisis del sistema mecánico

Para el diseño del equipo se tuvo en cuenta un motor eléctrico, este será el encargado de revolucionar el eje y brindar la potencia y el movimiento al engrane, este es un motor convencional ya que por la poca fuerza que se tendrá en el plato dosificador, no es necesario un motor con un diseño específico (Figura 9).

Figura 9: Motor eléctrico



Fuente: General Eléctric, 2010

- **Propiedades del motor**

Velocidad angular= 3000rpm

Par torsor= 10 kg*cm

Eficiencia del motor de: 0,9

Dimensiones: 10*12*26 mm

Diámetro del eje= 3mm

Luego se procede con el diseño de los elementos mecánicos de la máquina como los engranes, el eje y los rodamientos. Primero se desarrollaron los cálculos de los engranajes basados en el libro de “Diseños de elementos de Máquina” de Robert Mott (2006). Se

tomaron los valores base para el desarrollo de los cálculos y se presentan a continuación. Debido a que el motor eléctrico presenta pérdidas por eficiencia se toma el valor de 2700 rpm que sería igual al 3000 rpm por el 90% de eficiencia. Se desea que la velocidad de salida sea de 1000 rpm ya que es la velocidad angular que generalmente se trabaja para este tipo de máquinas de electrohilado.

Paso diametral: 28

Número de dientes del piñón=46

Velocidad angular real= 2700 rpm

▪ **Ángulo de presión: 20°**

Con las relaciones entre dientes y velocidad angular se lleva a cabo el proceso.

$$\frac{n_p}{n_g} = \frac{N_g}{N_p}$$

np= revoluciones de piñón

ng= revoluciones de engrane

NP= Número de dientes del piñón

Ng= Número de dientes del engrane

$$\frac{n_p}{n_g} N_p = N_g = 46 \left(\frac{2700}{1000} \right) = 124,2$$

Aproximando a 125 dientes ya que no son indispensable las partes enteras de los dientes.

Esta aproximación modifica la revolución que presentará el engranaje.

$$n_p \left(\frac{N_p}{N_g} \right) = n_g = 2700 \left(\frac{46}{125} \right) = 993.6 \text{ RPM}$$

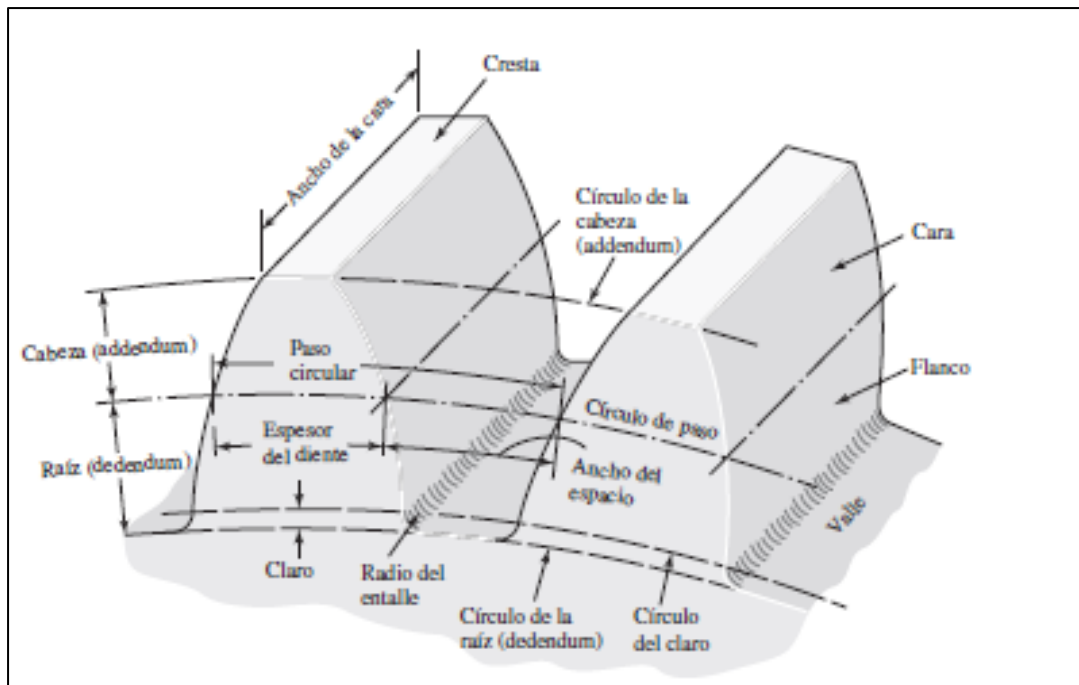
La geometría de los engranes se calculó de la siguiente manera.

$$D_p = \frac{46}{28} = 1,64 \text{ in} = 4,1656 \text{ cm}$$

$$D_g = \frac{125}{28} = 4,464 \text{ in} = 11,34 \text{ cm}$$

$$p = \pi \left(\frac{D_p}{N_p} \right) = \pi \left(\frac{1,64 \text{ in}}{46} \right) = 0,112 \text{ in} = 2,85 \text{ mm}$$

Figura 10: Medidas principales engranes



Fuente: tomado de Mott (2006)

▪ Addendum

$$a = \frac{1}{P_d} = \frac{1}{28} = 0,036 \text{ in} = 0,91 \text{ mm}$$

▪ Dedendum

$$b = \frac{1,25}{P_d} = \frac{1,25}{28} = 0,045 \text{ in} = 1,14 \text{ mm}$$

▪ Holgura

$$c = \frac{0,25}{P_d} = \frac{0,25}{28} = 8,9 \times 10^{-3} \text{ in} = 0,23 \text{ mm}$$

- Diámetro exterior del piñón

$$D_{op} = \frac{N_p + 2}{P_d} = \frac{46 + 2}{28} = 1,71 \text{ in} = 43,54 \text{ mm}$$

- Diámetro exterior del engrane

$$D_{og} = \frac{N_g + 2}{P_d} = \frac{125 + 2}{28} = 4,53 \text{ in} = 115,2 \text{ mm}$$

Diámetro de raíz para el piñón

$$D_{rp} = D_p - 2b = 1,64 \text{ in} - 2(0,045 \text{ in}) = 1,55 \text{ in} = 39,37 \text{ mm}$$

Diámetro de raíz del engrane

$$D_{rg} = D_g - 2b = 4,464 \text{ in} - 2(0,045 \text{ in}) = 4,374 \text{ in} = 111,1 \text{ mm}$$

- Altura total

$$h = a + b = 0,91 \text{ mm} + 1,14 \text{ mm} = 2,05 \text{ mm}$$

$$h_k = 2a = 2(0,91 \text{ mm}) = 1,82 \text{ mm}$$

- Espesor del diente

$$t = \frac{\pi}{2P_d} = \frac{\pi}{2(28)} = 0,056 \text{ in} = 1,42 \text{ mm}$$

- Distancia entre centros

$$C = \frac{N_g + N_p}{2P_d} = \frac{46 + 125}{2(28)} = 3,05 \text{ in} = 7,76 \text{ cm}$$

- Diámetro base

$$D_{bp} = D_p \cos \theta = 1,64 \text{ in} * (20) = 1,54 \text{ in} = 39,14 \text{ mm}$$

$$D_{gp} = D_g \cos \theta = 4,464 \text{ in} * \cos(20) = 4,19 \text{ in} = 106,54 \text{ mm}$$

▪Potencia

$$T = \frac{P}{\omega} \rightarrow P = T\omega = 0,98 \text{ Nm}(2700 \text{ rpm}) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}}\right) \left(\frac{2\pi}{1 \text{ rev}}\right) = 277 \text{ W}$$

Se calcula el par torsor del piñón, para determinar la fuerza normal que se aplica en el engrane y de la cual se desprende la fuerza tangencial y la fuerza normal. La fuerza normal se transmite al eje que se encargará de soportar dicha carga, esta será la carga con la que se realizó la simulación en el software.

$$P = T * \frac{\pi n}{30}$$

$$T = \frac{30P}{\pi n} = \frac{30(277)}{\pi(993,6)} = 2,7 \text{ N} * \text{m}$$

$$F_t = \frac{T}{r} = \frac{2,7 \text{ N} * \text{m}}{0,0567 \text{ m}} = 47,6 \text{ N}$$

$$F_n = \frac{47,6 \text{ N}}{\cos(20)} = 50,65 \text{ N}$$

$$F_r = 50,65 \text{ N} * \text{sen}(20) = 17,32 \text{ N}$$

El tamaño del eje se desarrolló teniendo en cuenta el diámetro mínimo, y un diámetro más adecuado para llevar a cabo la instalación del plato colector. Primero se determina el material del eje para poder desarrollar el cálculo, escogiendo el cobre se extrae su esfuerzo a cedencia del apéndice b del libro mecánica de material de Ferdinand Beer. Se elegirá un factor de diseño de 2 para tener un eje más confiable y resistente, el torque usado es el calculado anteriormente. Se tienen entonces los siguientes parámetros $S_y=70$ Mpa, $T=2,7 \text{ N} * \text{m}$, $N=2$, $S_n=40$ MPa.

$$D = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{KM}{S_n}\right)^2 + \frac{3}{4}\left(\frac{T}{S_y}\right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left(\frac{1,5(10,13)}{40000000}\right)^2 + \frac{3}{4}\left(\frac{2,7}{70000000}\right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} = 0,0084 \text{ m} = 8,4 \text{ mm}$$

El diámetro mínimo que debe tener el eje para no tener fallas es de 8,38 mm, pero por facilidad de acople al rodamiento se determinará la sección de 12,7 mm., ya que este es el diámetro de uno convencional.

3.1.5 Análisis de flujo del fluido

Los datos utilizados como caudal del inyector y la cantidad de orificios son extraídos de varios trabajos desarrollados en la UPTC sede Tunja, donde se obtuvieron hilos resistentes y simétricos.

Caudal inyector = 1ml/h = 0,27778 mm³/s

Distancia dosificadora colector = 15 cm

Cantidad de huecos = 4 huecos

Diámetro de los huecos = 0,4 mm

Diámetro del plato dosificador = 5 cm

- **Área de los agujeros**

$$A = 8 \left[\frac{\pi}{4} (0,5mm)^2 \right] = 1,57mm^2$$

$$Q = A * v$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0,27778 \frac{mm^3}{s}}{1,57mm^2} = 0,18 \frac{mm}{s}$$

$$A_c = rw^2 = \frac{v^2}{r}$$

$$w = \frac{v}{r} = \frac{0,18mm}{25mm} = 0,0072 \frac{rad}{s} = 0,068 rpm$$

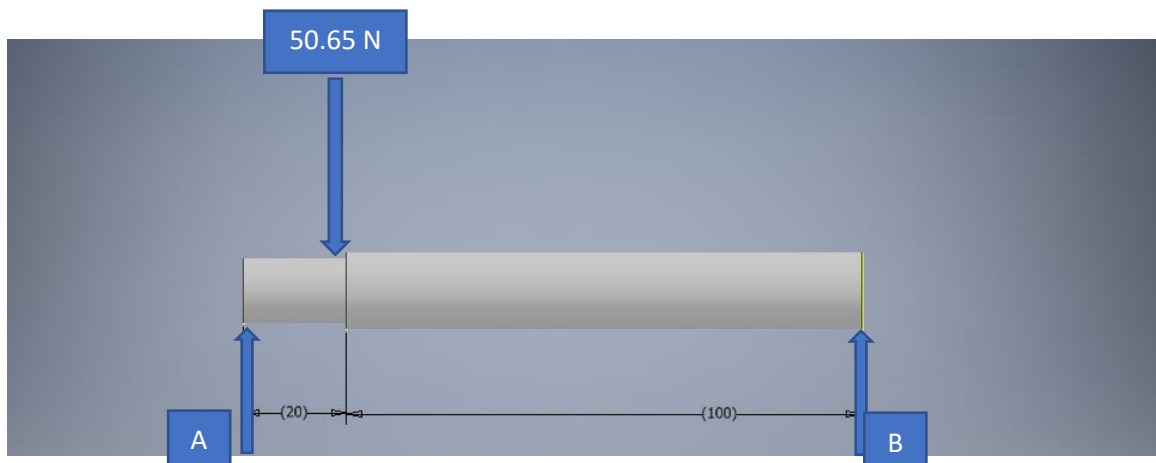
Esta sería la velocidad angular mínima para asegurar la salida del caudal del fluido, sin embargo, se escogerá una velocidad de 1000 rpm que permitirá que la partícula se acelere más en el campo eléctrico y se pueda aumentar el caudal generado por la bomba inyectora, permitiendo la creación de membranas con características adecuadas a menor tiempo.

$$v = \omega r = 25\text{mm} \left(\frac{209,44\text{rad}}{s} \right) = 2618 \frac{\text{mm}}{s}$$

3.1.6 Análisis de esfuerzo a flexión

Ya que se tiene un eje en el cual actúa una fuerza perpendicular a este, se realiza el análisis de esfuerzo que se presenta en la máquina, más específicamente en el eje que conecta al motor eléctrico con el dosificador. Primero se determinan los diagramas de esfuerzos cortante y de momento flector. (Figuras 11, 12, 13 y 14)

Figura 11: Diagrama de fuerzas



Fuente: Autor, 2021

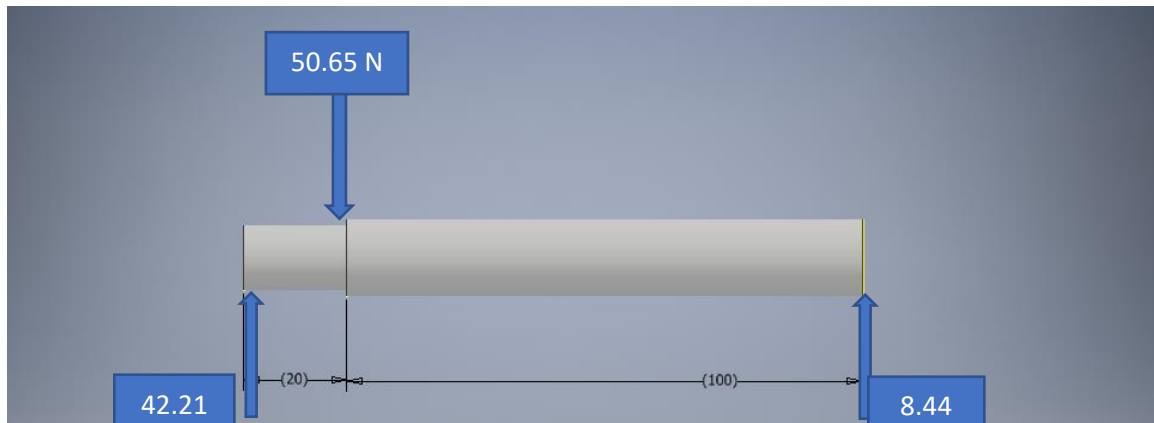
$$\sum Fy = 0 = FA - 50.65 + FB$$

$$\sum Ma = -20(50.65) + 120(FB) = 0$$

$$FB = \frac{20(50.65)}{120} = 8.44\text{N}$$

$$FA = 50.65 - 8.44 = 42.21\text{N}$$

Figura 12: Diagrama de fuerzas 2



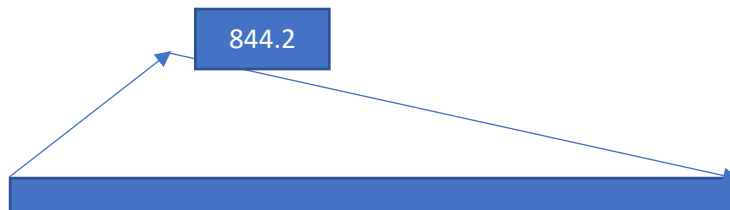
Fuente: Autor, 2021

Figura 13: Diagrama cortante



Fuente: Autor, 2021

Figura 14: Diagrama de momento flector



Fuente: Autor, 2021

Para el momento de inercia de la pieza y la distancia entre el centro y el extremo, se promediaron los dos radios del eje, donde el primero es 0,0635 m y el segundo 0,075 m.

$$I_y = \frac{1}{4} \pi r^4 = \frac{1}{4} \pi \left(\frac{0.0635 + 0.075}{2} \right)^4 = 0.000018 \text{ m}^4$$

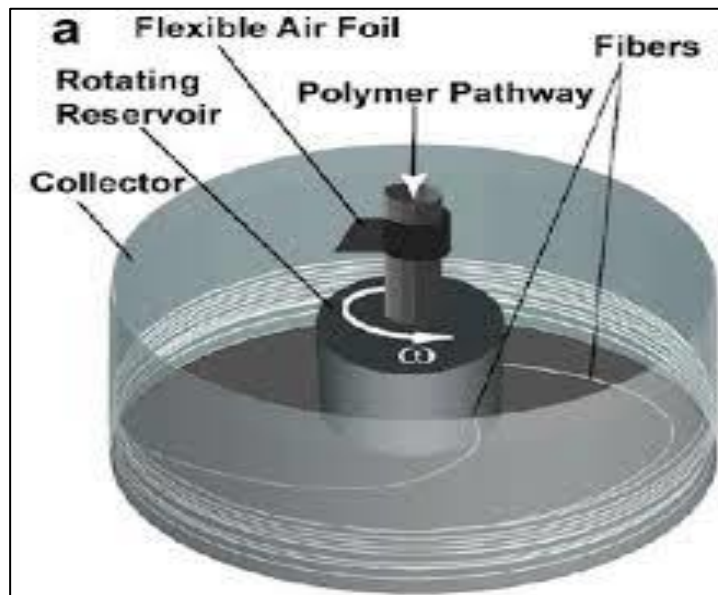
$$\sigma = \frac{M * C_a}{I_y} = \frac{(844.2 \text{ Nm}) * \left(\frac{0.0635 + 0.075}{2} \right)}{0.000018 \text{ m}^4} = 3.24 \text{ MPa}$$

4. Simulación del funcionamiento del equipo de electrohilado por centrifugado

4.1 Modelado de piezas en Inventor

Como se desea la construcción de una máquina de electrohilado por método de centrifugado, entonces las cargas significativas estarán en el eje y los engranes, el resto de la estructura será utilizada más que todo como soporte y como protección frente a factores externos como el polvo. En la Figura 15 se observa una máquina que servirá como guía para el diseño. El software utilizado para llevar a cabo el diseño y ensamble de las piezas es Inventor 2019.

Figura 15: Esquema centrifugado.



Fuente: Labnet International (2017)

2.5.1 Eje

El eje se diseñará con un material conductor ya que este transmitirá por medio de las escobillas el voltaje necesario al plato colector, produciendo el cono de Taylor en los orificios del plato. Teniendo en cuenta que el diámetro mínimo es de 8,4 mm se escogieron las siguientes dimensiones:

Sección 1 = diámetro 12,7

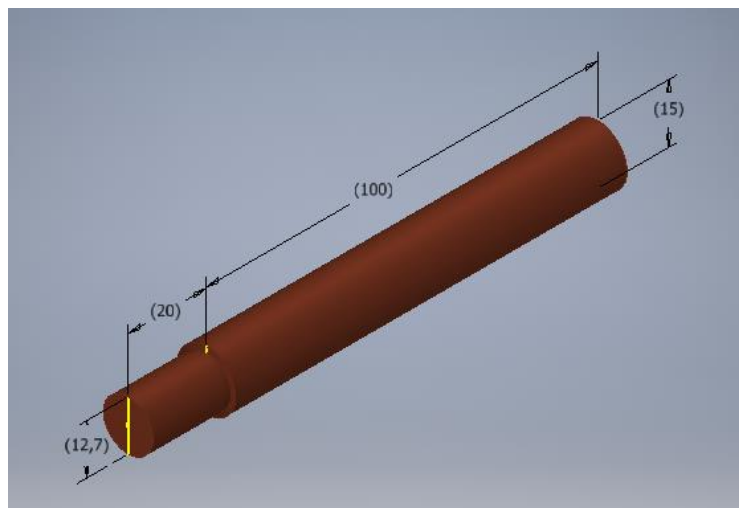
Largo= 20

Sección 2= diámetro = 15

Largo = 100

Material: Cobre

Figura 16: Eje engrane

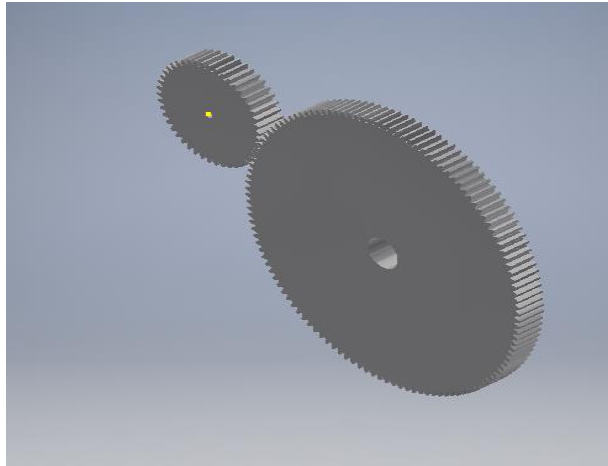


Fuente: Autor, 2021

2.5.2 Engranajes

Se diseñan los engranes de acuerdo con los cálculos realizados en la sección correspondiente. El material seleccionado será de acero, debido a las propiedades mecánicas que presenta. (Ver Figura 17)

Figura 17: Engranés



Fuente: Autor, 2021

2.5.3 Plato dosificador

El plato dosificador es aquel donde se formará el cono de Taylor (en los agujeros que tiene en su cara) y saldrá expulsada la solución para la formación de los hilos, este plato se diseña en cobre por las propiedades eléctricas que genera. (Figura 18)

Diámetro 50 mm

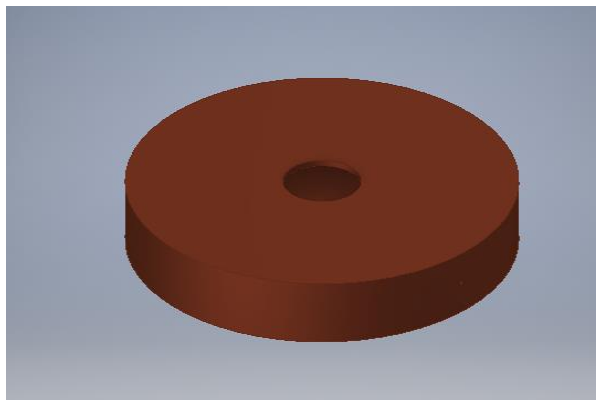
Altura 10 mm

Agujero inferior 15 mm

Agujero superior 10 mm

Material: cobre

Figura 18: Plato dosificador



Fuente: Autor, 2021

2.5.4 Motor

El motor utilizado es el mismo que se menciona en la sección correspondiente y se diseña de acuerdo a las dimensiones allí plasmadas. (Ver Figura 19)

25*20 mm

Altura 40 mm

Altura del eje: 30 mm

Diámetro del eje: 3 mm

Figura 19: Motor



Fuente: Autor, 2021

2.5.5 Rodamiento

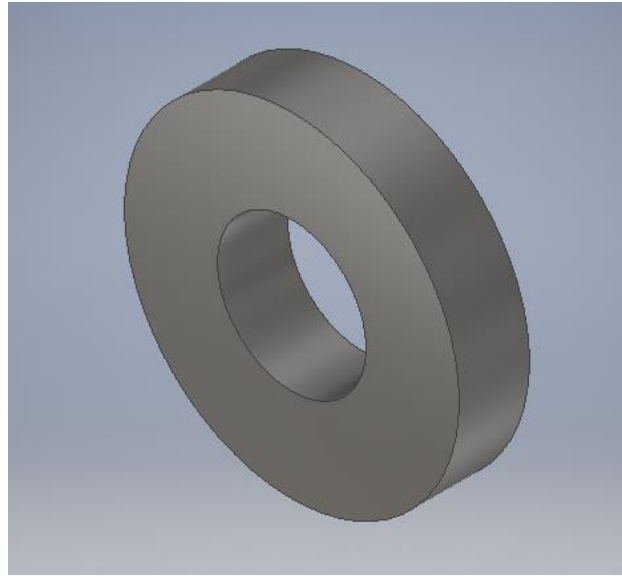
El rodamiento es un rodamiento comercial de ½ pulgada. (Figura 20)

Diámetro interior 12,7 mm

Diámetro exterior 28,575 mm

Altura 4,969 mm

Figura 20: Rodamiento



Fuente: Autor, 2021

2.5.6 Plato colector

El plato colector es la parte del ensamble donde se pegarán los hilos de electrohilado, formando una membrana delgada de la solución polimérica, se escoge el cobre para esta pieza debido a las propiedades eléctricas que presenta. En esta parte de la máquina irá conectada una de las cargas de la fuente para generar el campo eléctrico.

Diámetro exterior 405 mm

Diámetro interior 400 mm

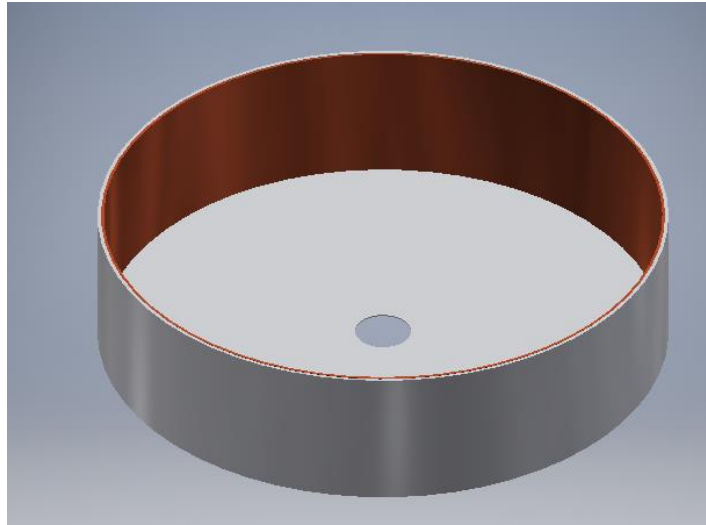
Recubrimiento en cobre: 2 mm

Altura 101 mm

Material: cobre la parte interior, de la circunferencia, el resto será de plástico.

A continuación en la figura 21 se puede observar el plato colector diseñado.

Figura 21: Plato colector

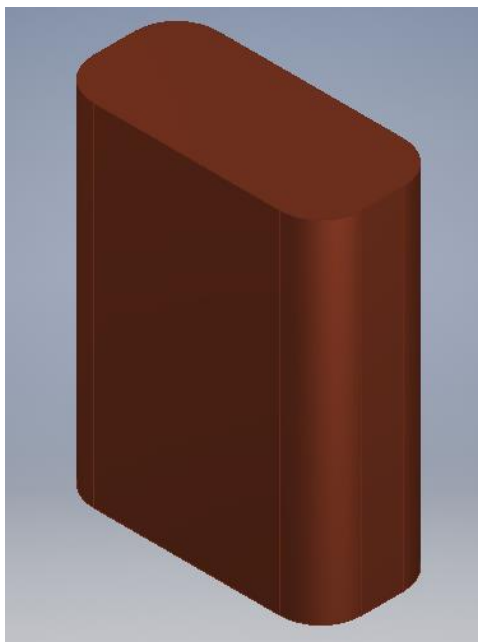


Fuente: Autor, 2021

2.5.7 Escobilla

Las escobillas permitirán la transmisión de la electricidad al eje y posteriormente al plato. La escobilla utilizada es una escobilla convencional (6*13 mm - Altura 17 mm) (Figura 22)

Figura 22: Escobilla

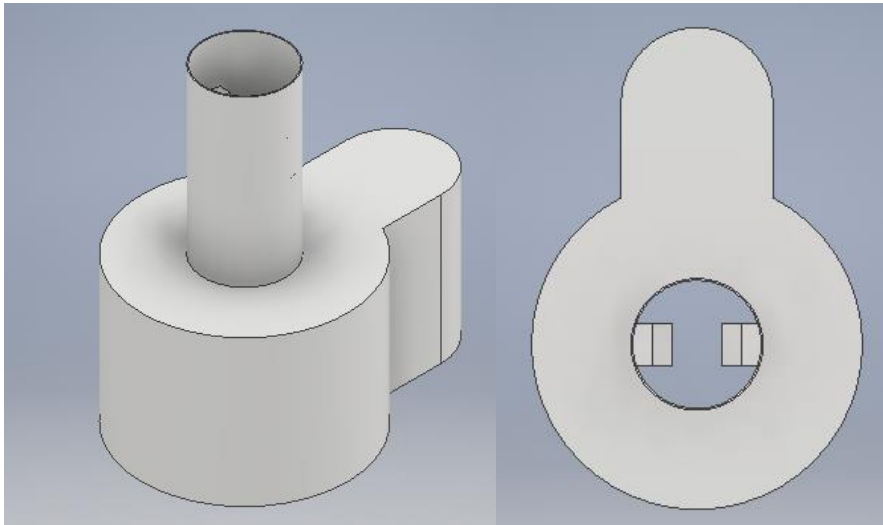


Fuente: Autor, 2021

2.5.8 Carcasa

La carcasa tiene como función principal recubrir la máquina, generando protección contra el polvo y golpes. El material escogido fue de plástico asegurando que el hilo solo sea atraído por el plato colector. (Figura 23)

Figura 23: Figura carcasa



Fuente: Autor, 2021

4.5.9 Bomba inyectora

Se toma de prototipo una bomba inyectora de aguja, debido al caudal que genera, solo se tomará como referencia ya que no se diseñará debido a la parte de circuitos y programación que posee para llevar a cabo su función. (Figura 24)

Figura 24: Bomba inyectora

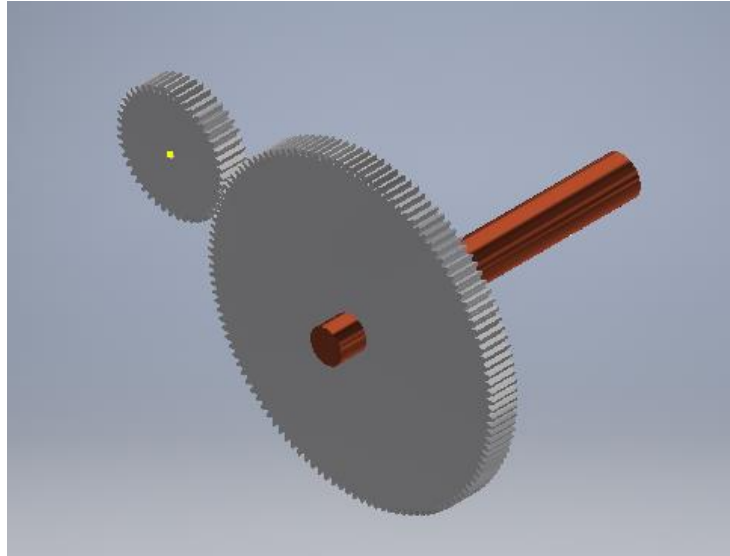


Fuente: Autor, 2021

4.2 Ensamble de la máquina

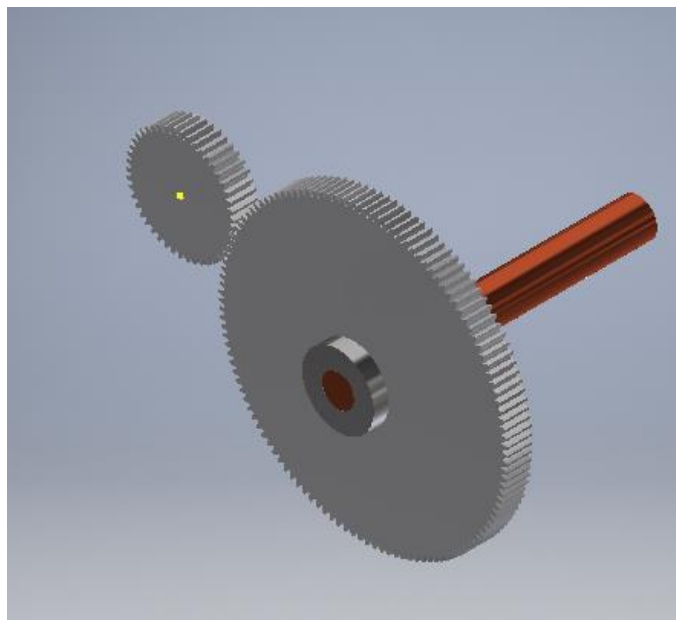
Se muestra a continuación el paso a paso del ensamble total de la máquina, indicando la ubicación de cada pieza, para así dar un panorama más amplio del diseño.

Figura 25: Ensamble eje



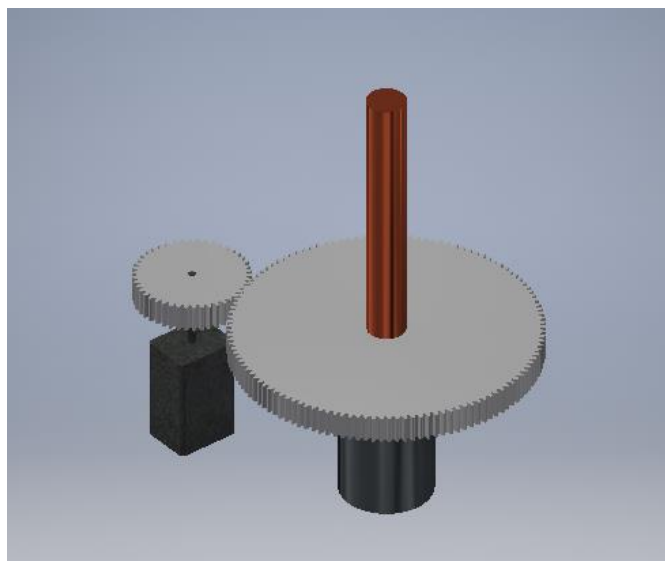
Fuente: Autor, 2021

Figura 26: Ensamble rodamiento



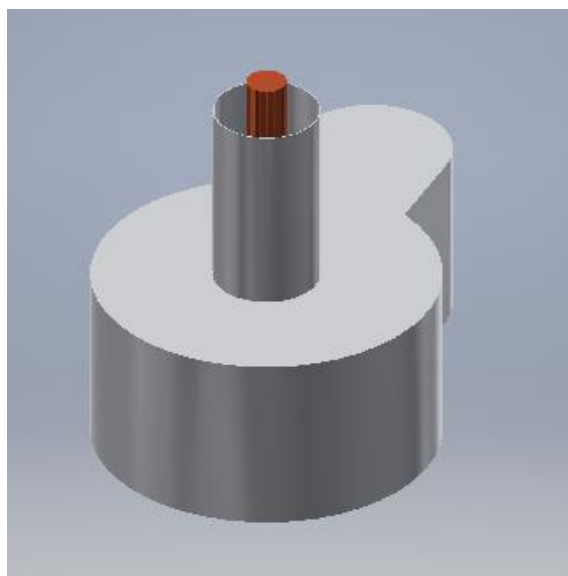
Fuente: Autor, 2021

Figura 27: Ensamble motor



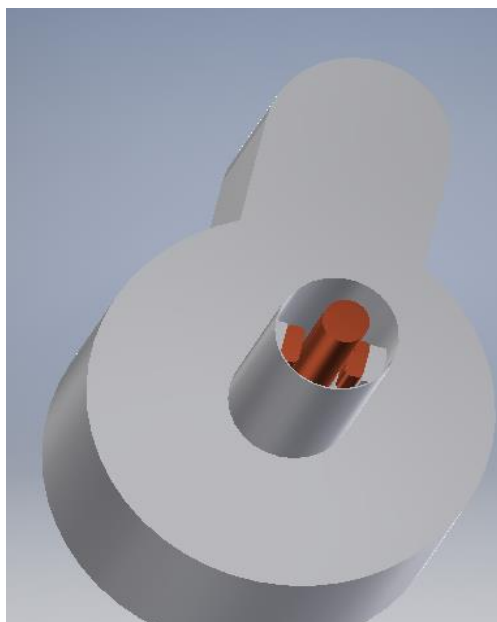
Fuente: Autor, 2021

Figura 28: Ensamble carcasa



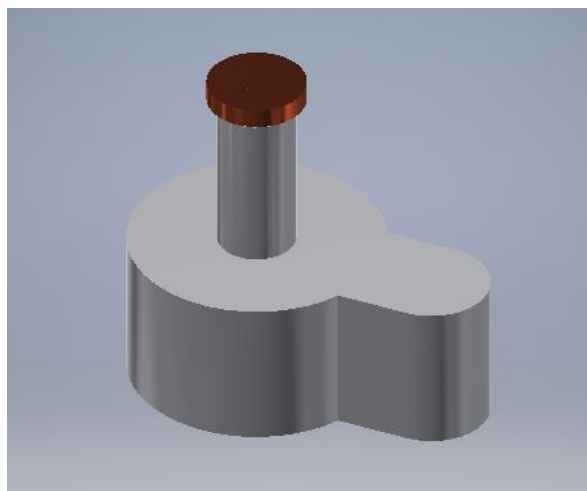
Fuente: Autor, 2021

Figura 29: Ensamble escobillas



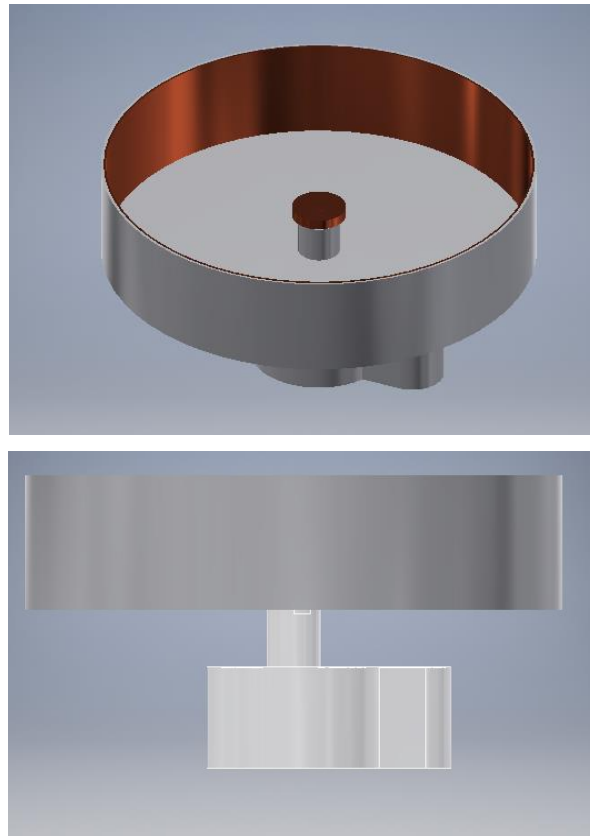
Fuente: Autor, 2021

Figura 30: Ensamble plato dosificador



Fuente: Autor, 2021

Figura 31: Ensamble plato colector



Fuente: Autor, 2021

4.3 Simulación de esfuerzos

El elemento de la estructura que va a soportar mayor esfuerzo será el eje que conecta al engrane con el plato dosificador, donde se realizó un análisis de esfuerzo, debido a que los otros elementos como rodamientos soportarán un esfuerzo muy pequeño que no los llevará a un esfuerzo último, no se simularán. El programa utilizado para la simulación es Autodesk Inventor 2019 y la herramienta es análisis de tensión donde se verificará la deformación y el esfuerzo que genera la carga en el eje.

EL software utiliza como método de análisis de esfuerzo el método de Von Misses, Este sistema predijo que la falla por fluencia en materiales dúctiles se generaba cuando la energía de deformación total por unidad de volumen alcanza o supera la energía de deformación correspondiente a la resistencia de fluencia y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\sigma' = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} / 2 \geq S_y$$

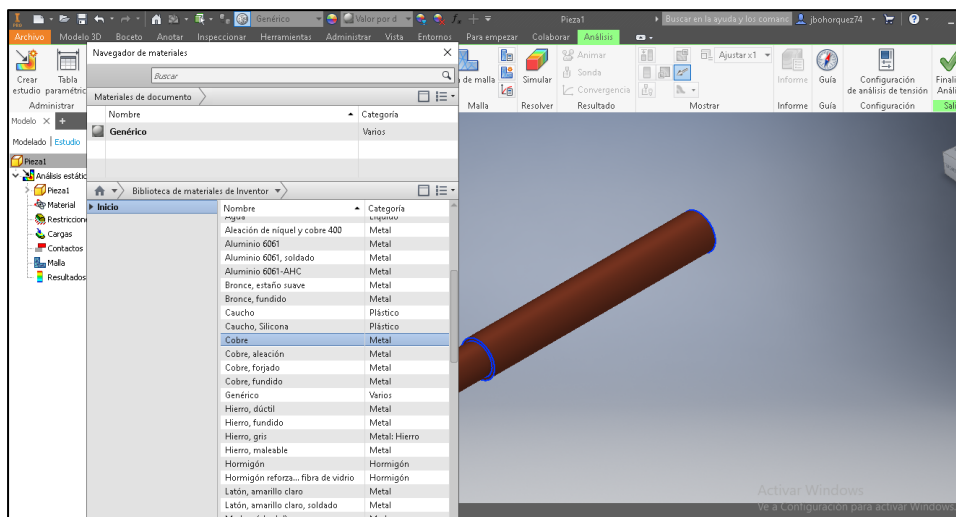
σ_1 = esfuerzo en x

σ_2 = esfuerzo en y

σ_3 = esfuerzo en z

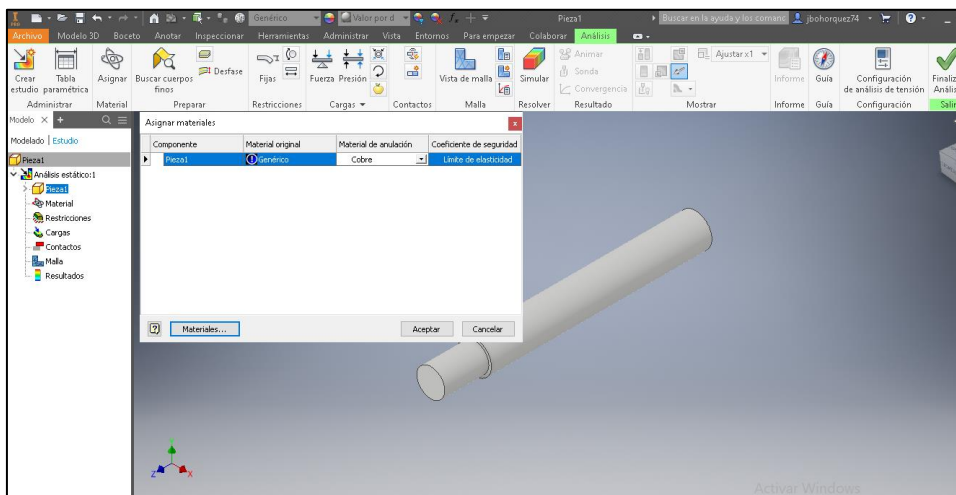
La interfaz de usuario permite seleccionar el tipo de material de la pieza, sino se tiene las propiedades del material no permite ingresar los valores para llevar a cabo el análisis de tensión (Figura 32)

Figura 32: Interfaz de simulación, selección de material



Fuente: Autor, 2021

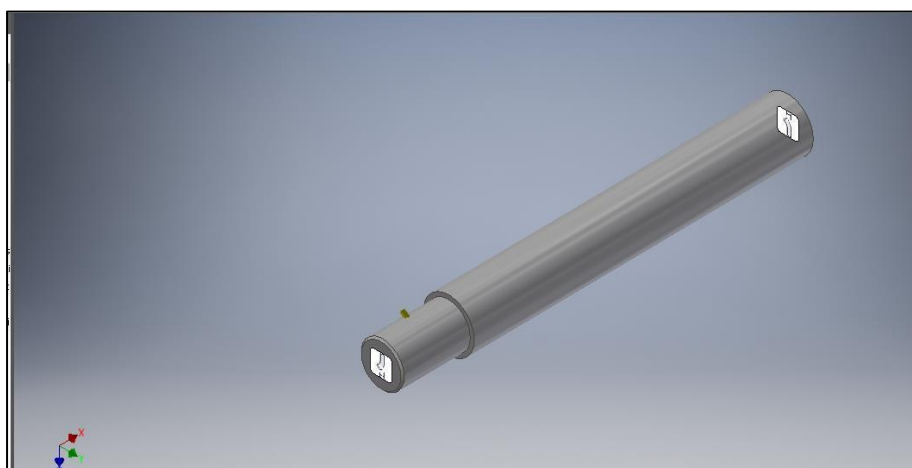
Figura 33: Interfaz de simulación, asignación del material



Fuente: Autor, 2021

Se restringen los extremos debido a que van a estar quietos por los rodamientos que se aplican en la parte inferior y superior de ensamble. La carga aplicada es la calculada en la sección de los cálculos y su valor es de 17,32 N, que es la fuerza radial que actúa sobre el engrane y la cual se transmite al eje.

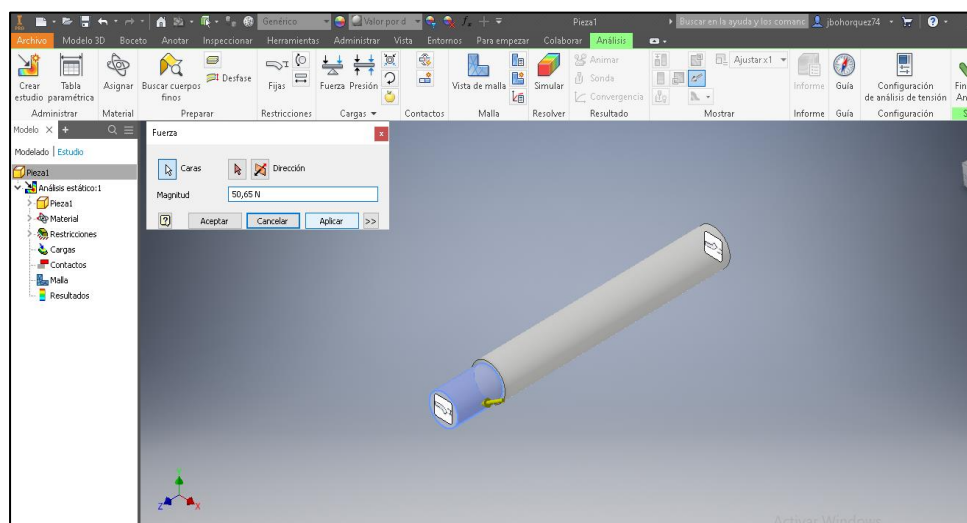
Figura 34: Restricciones en el eje



Fuente: Autor, 2021

La fuerza que se va a aplicar al eje es la producida por el motor y que se transmite por los engranes. La fuerza que se produce y que se calculó con anterioridad, dio un valor de 50.65 N, se inserta este valor en la simulación. (Figura 35)

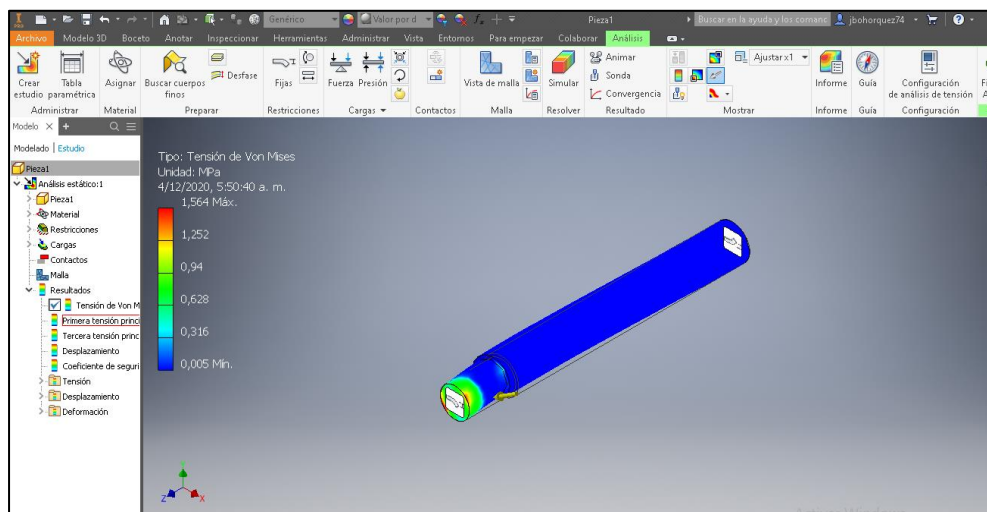
Figura 35: Fuerza radial



Fuente: Autor, 2021

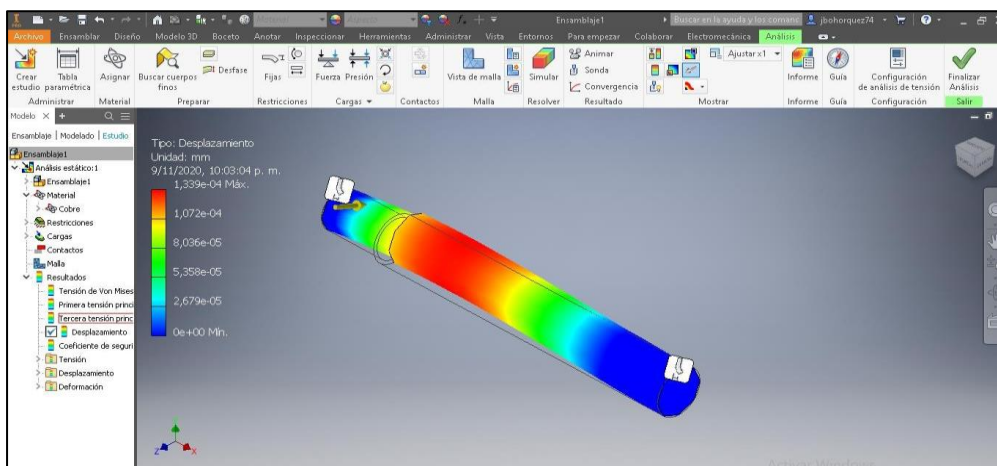
El programa muestra el esfuerzo producido en toda la pieza simulada, el color rojo indica la sección donde se presenta el mayor esfuerzo y la mayor deformación generada por la carga y el diseño del eje. El resultado para el eje se muestra en las figura 36 y 37.

Figura 36: Simulación esfuerzo a flexión



Fuente: Autor, 2021

Figura 37: Simulación de deformación en el eje



Fuente: Autor, 2021

El esfuerzo a flexión generado por la carga es de 1,56 Mpa y se presenta en la sección donde se acopla el engranaje, la deformación más grande obtuvo un valor de $2,9 \cdot 10^{-4}$ mm., ya que el esfuerzo es muy pequeño el material que se escogió para la pieza soporta dicha carga sin generar una deformación significativa.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Los cálculos que se desarrollaron en el proyecto indican que, tanto en la parte de esfuerzo y deformación, así como en el campo eléctrico, y en la velocidad de la máquina se generaría un adecuado diseño de las membranas.

El diseño permite un campo eléctrico de 66666,7 N/C, donde produce una aceleración necesaria para la producción de fibras, es importante resaltar que adicional a esto, se tiene la aceleración centrípeta que ayuda a esta formación. En el diseño mecánico se garantiza un funcionamiento adecuado de los engranes y el motor, proporcionando un caudal necesario, evitando taponamientos en el inyector.

La simulación arroja un valor menor que el calculado manualmente, esto se debe a que el método utilizado por la simulación tiene en cuenta los esfuerzos producidos en varias partes del eje debido a su geometría, mientras que en los cálculos manuales se promediaron los diámetros de las diferentes secciones del eje.

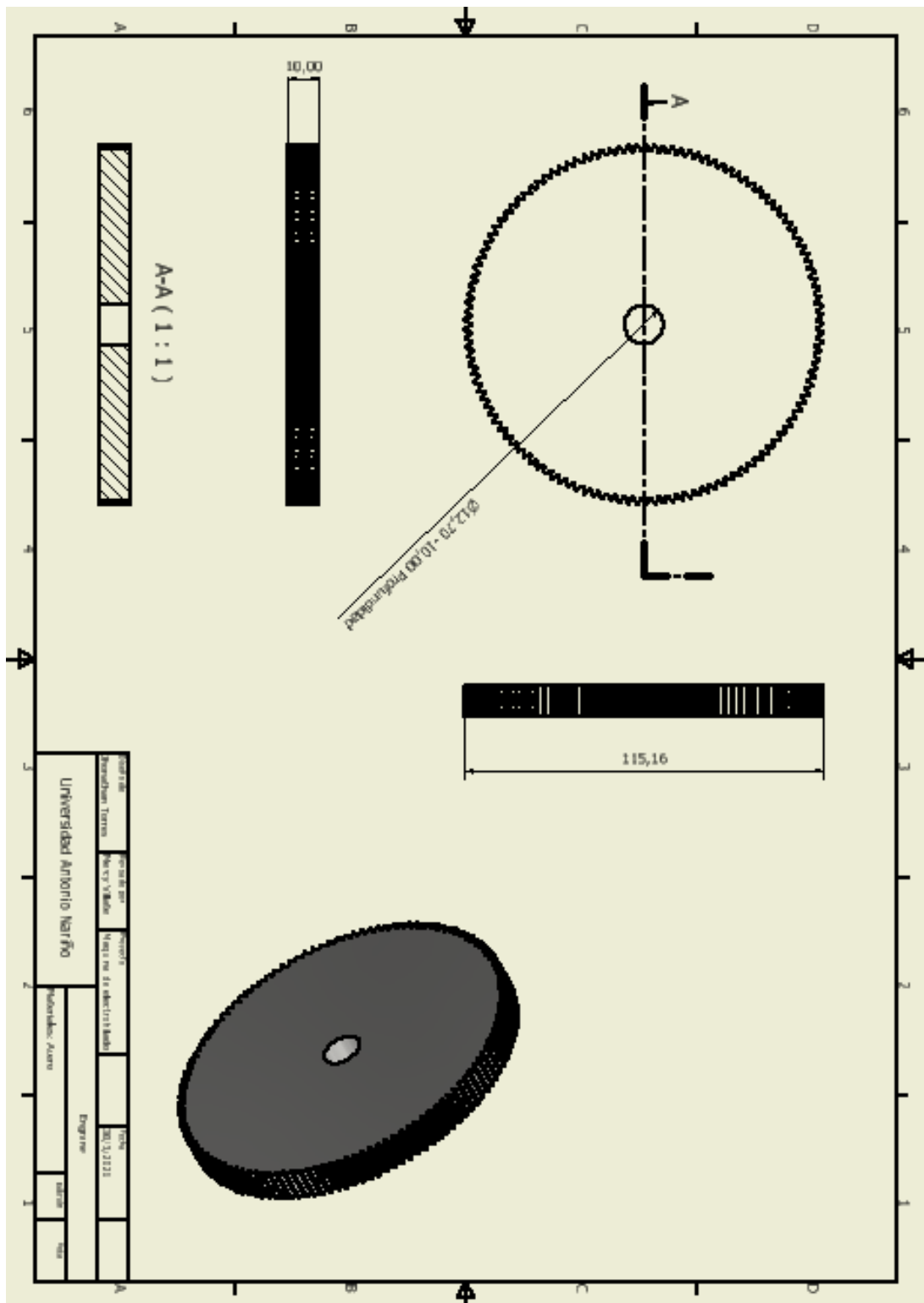
Las dimensiones de los engranes generaran las revoluciones esperadas en el planteamiento del diseño.

Las dimensiones y el material del eje soportan las cargas aplicadas, dando una adecuada transmisión sin generar turbulencias por desbalanceo.

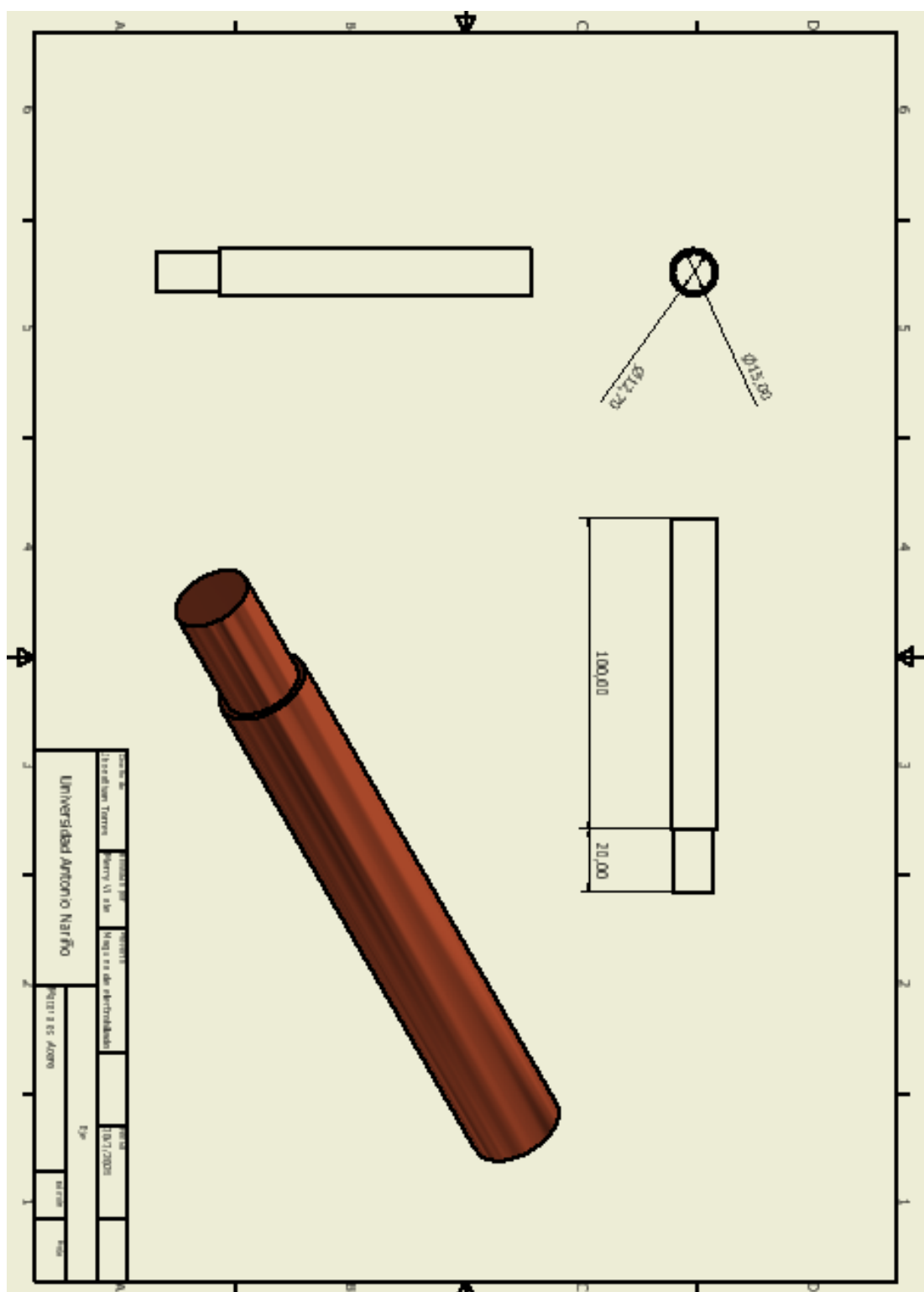
5.2 Recomendaciones

Se recomienda llevar a cabo la implementación del diseño en la construcción de la máquina para verificar la construcción de los hilos y determinar su eficiencia.

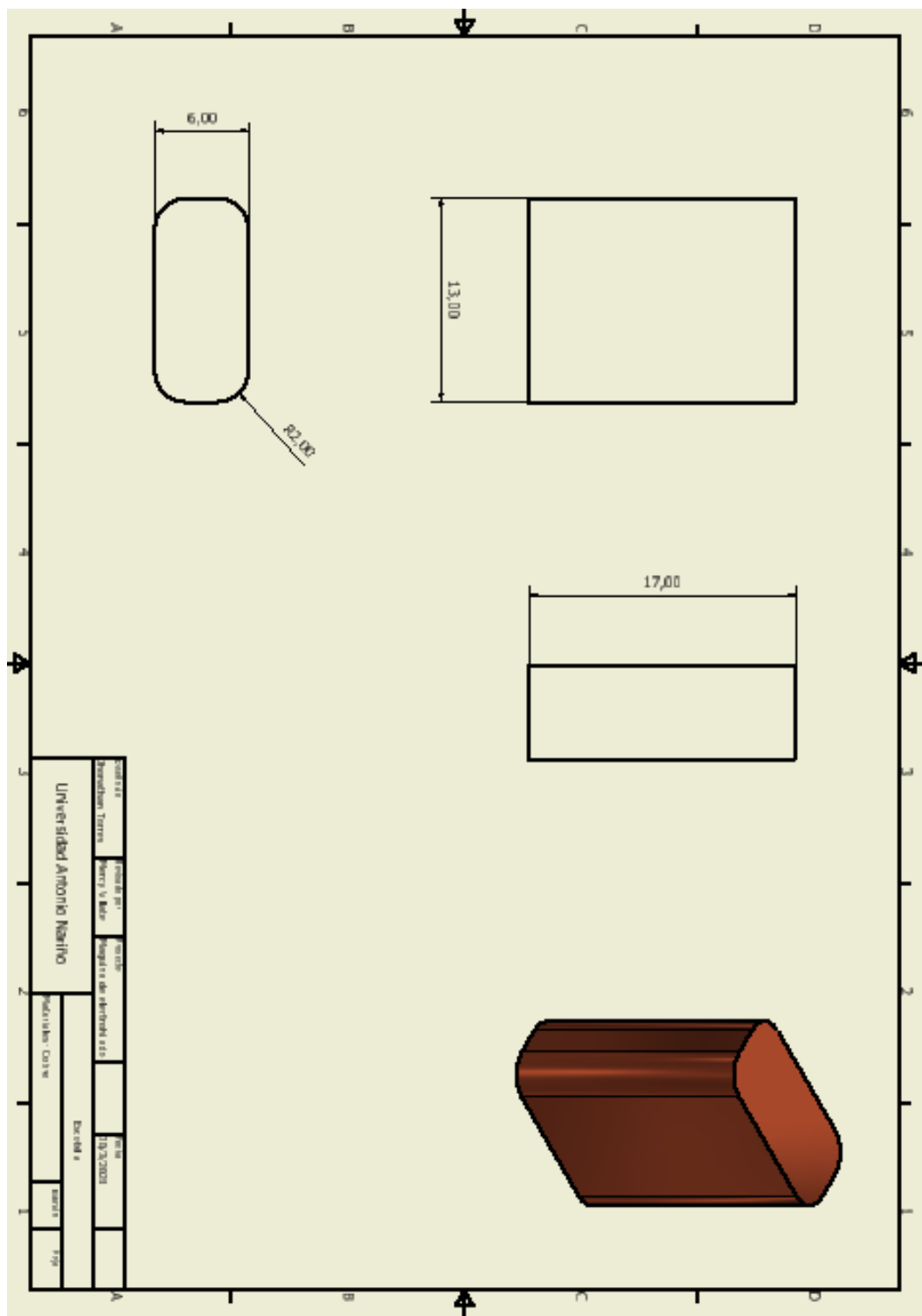
Engrane



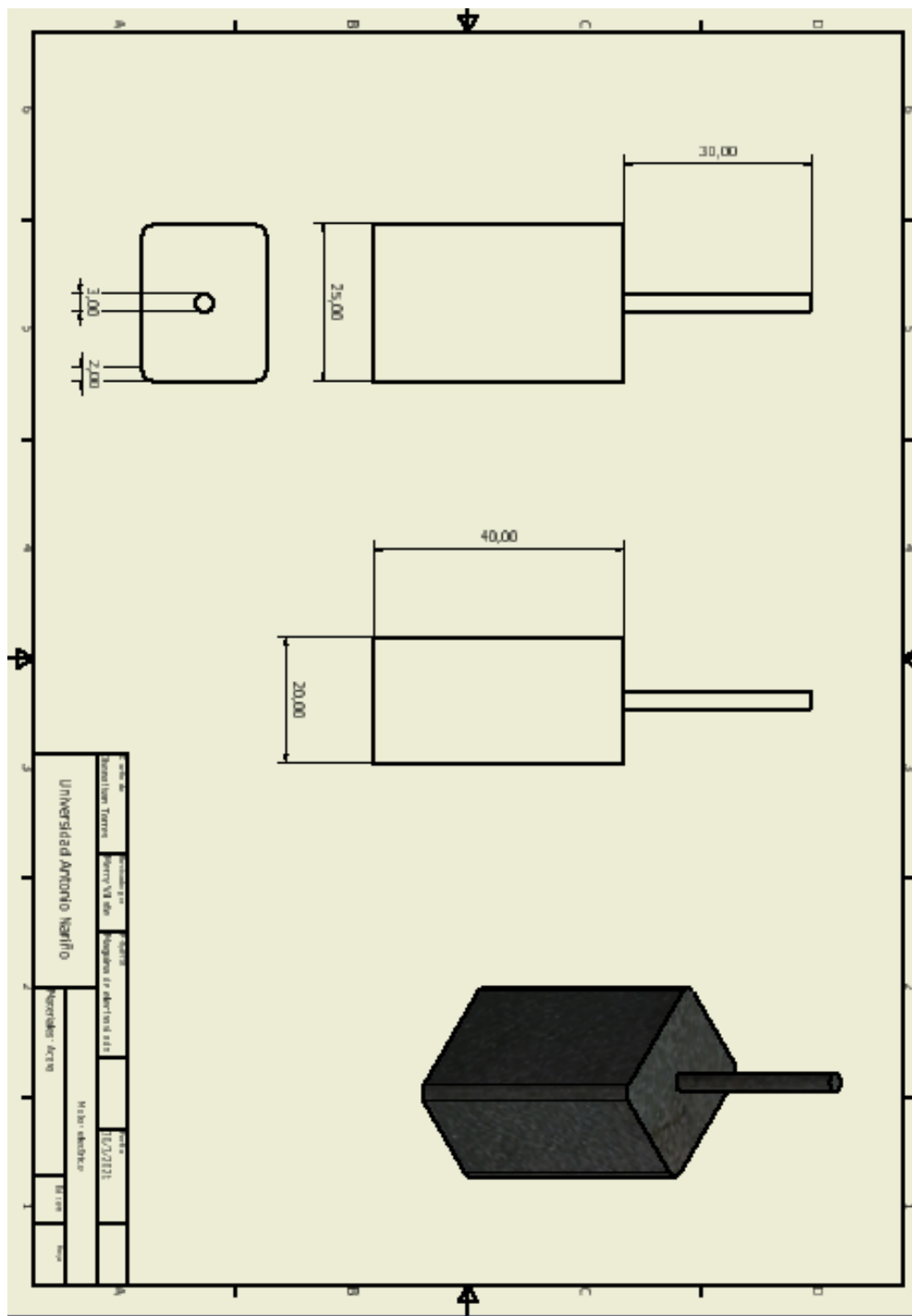
Eje engrane



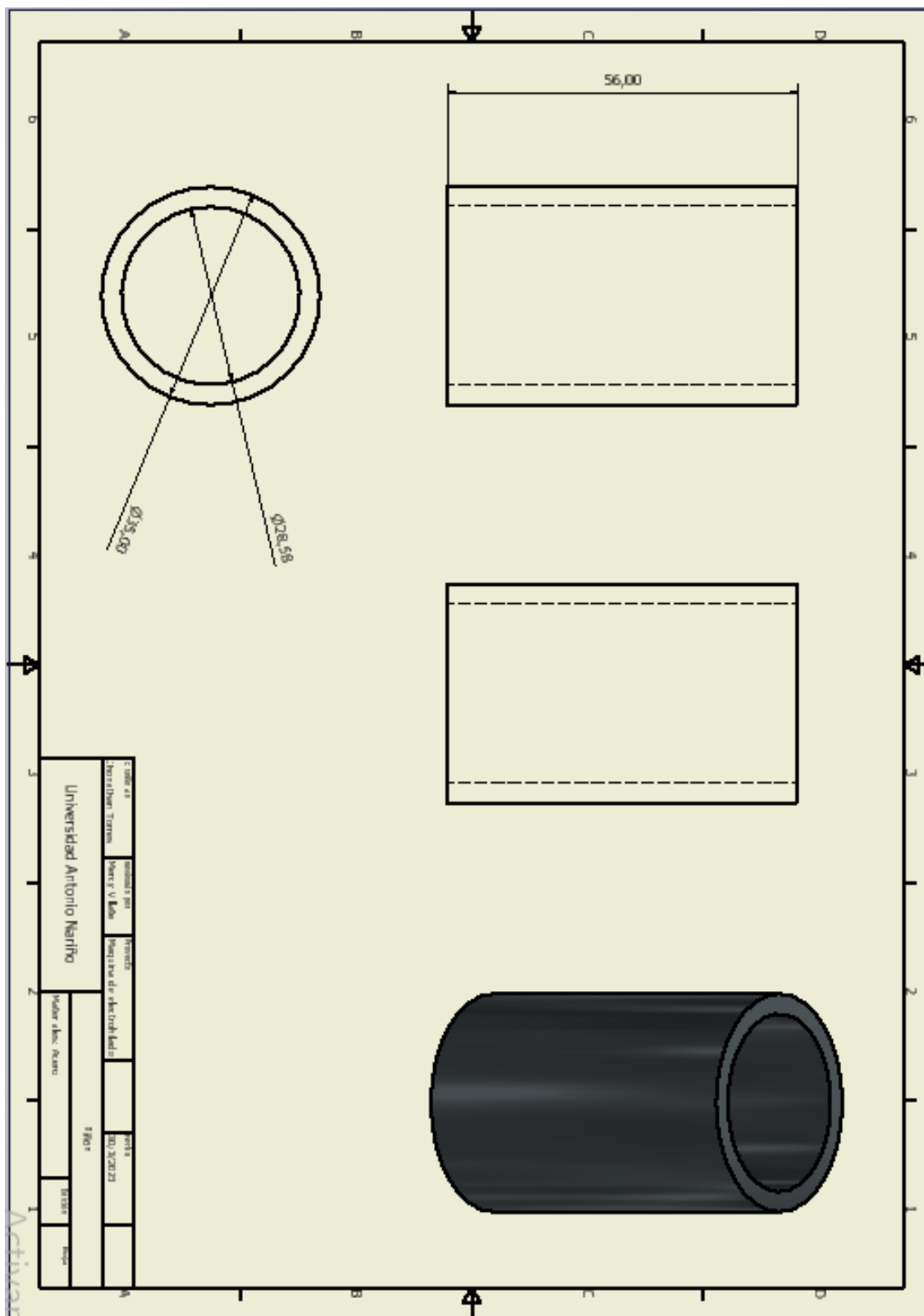
Escobilla



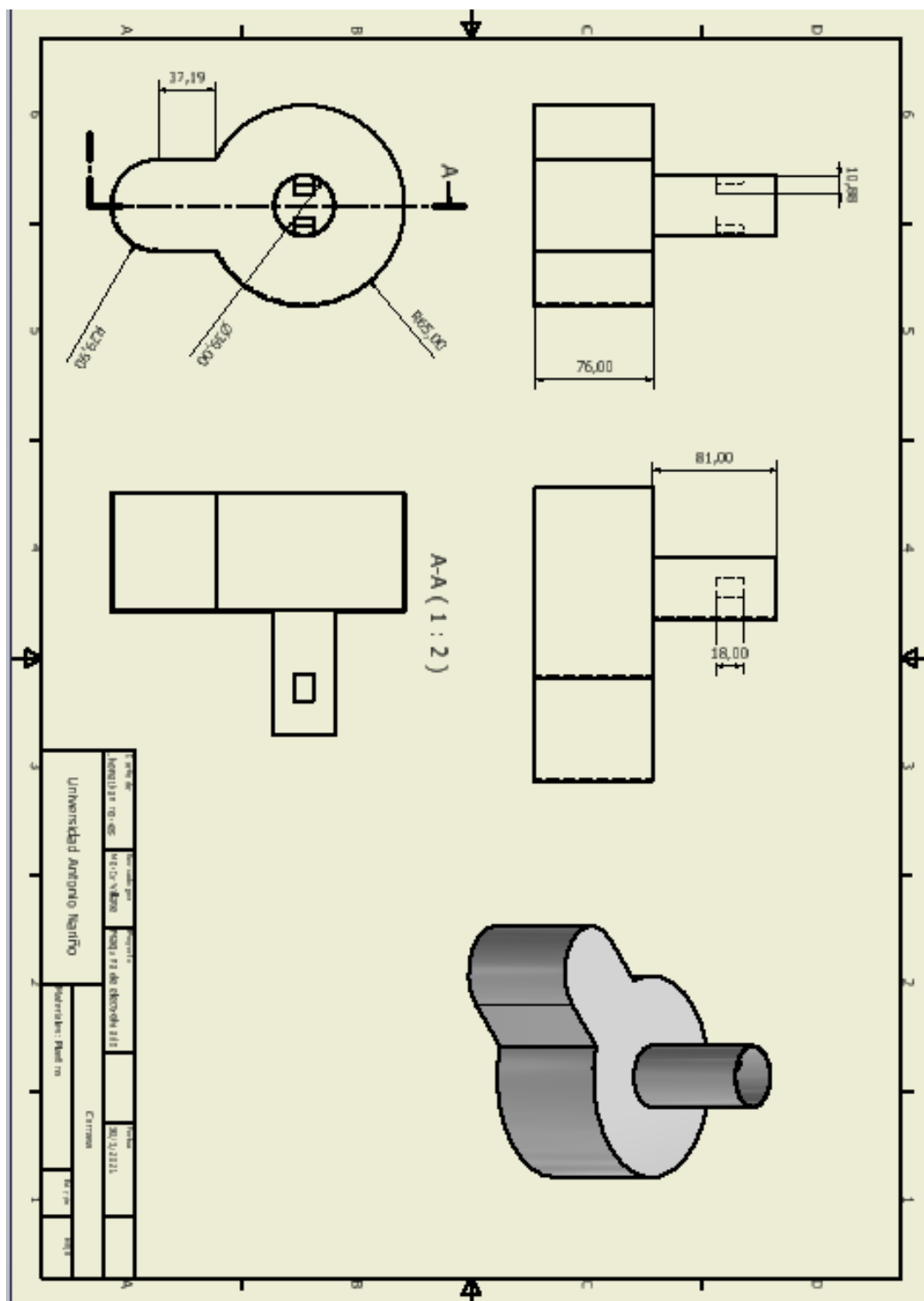
Motor



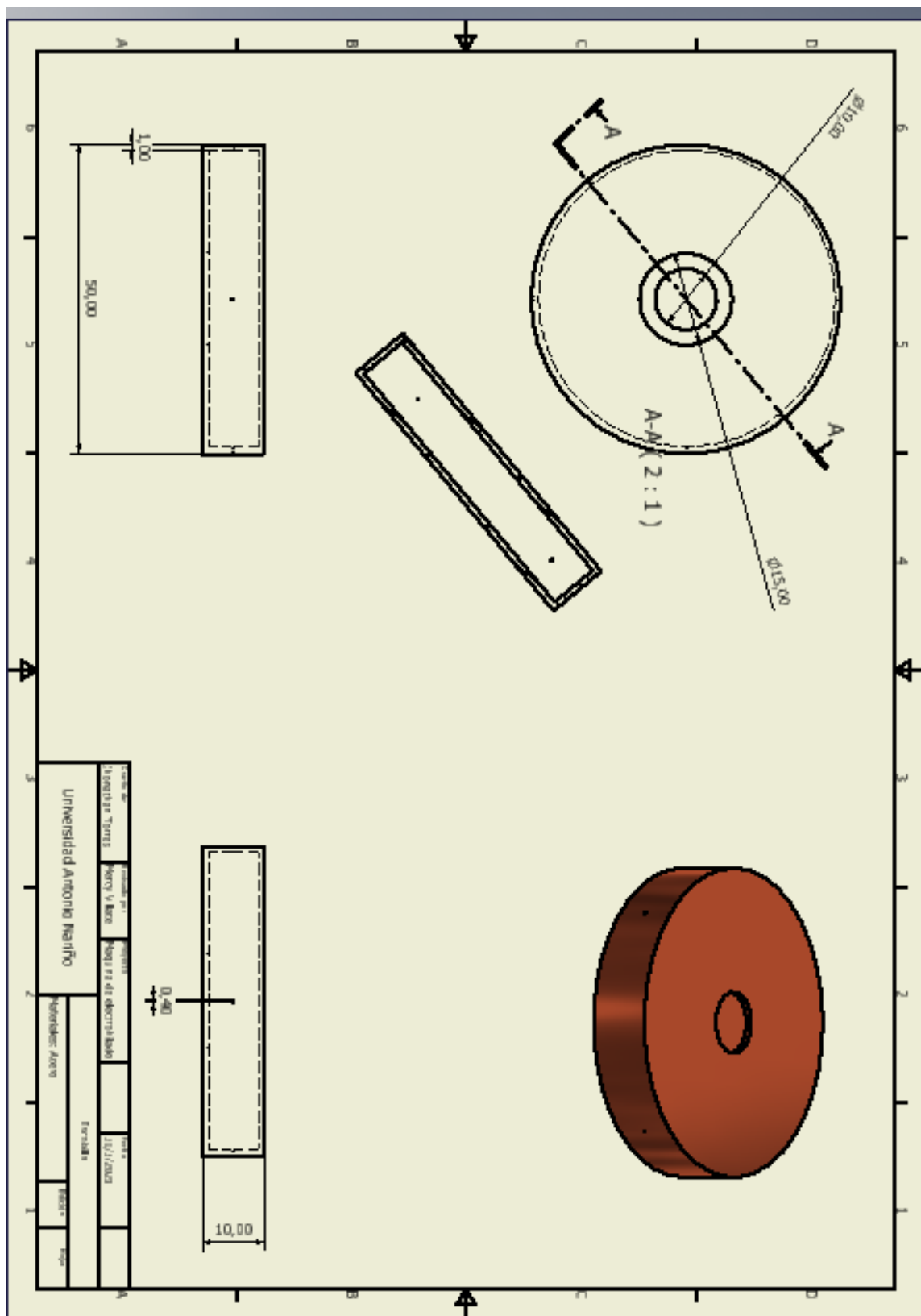
Soporte



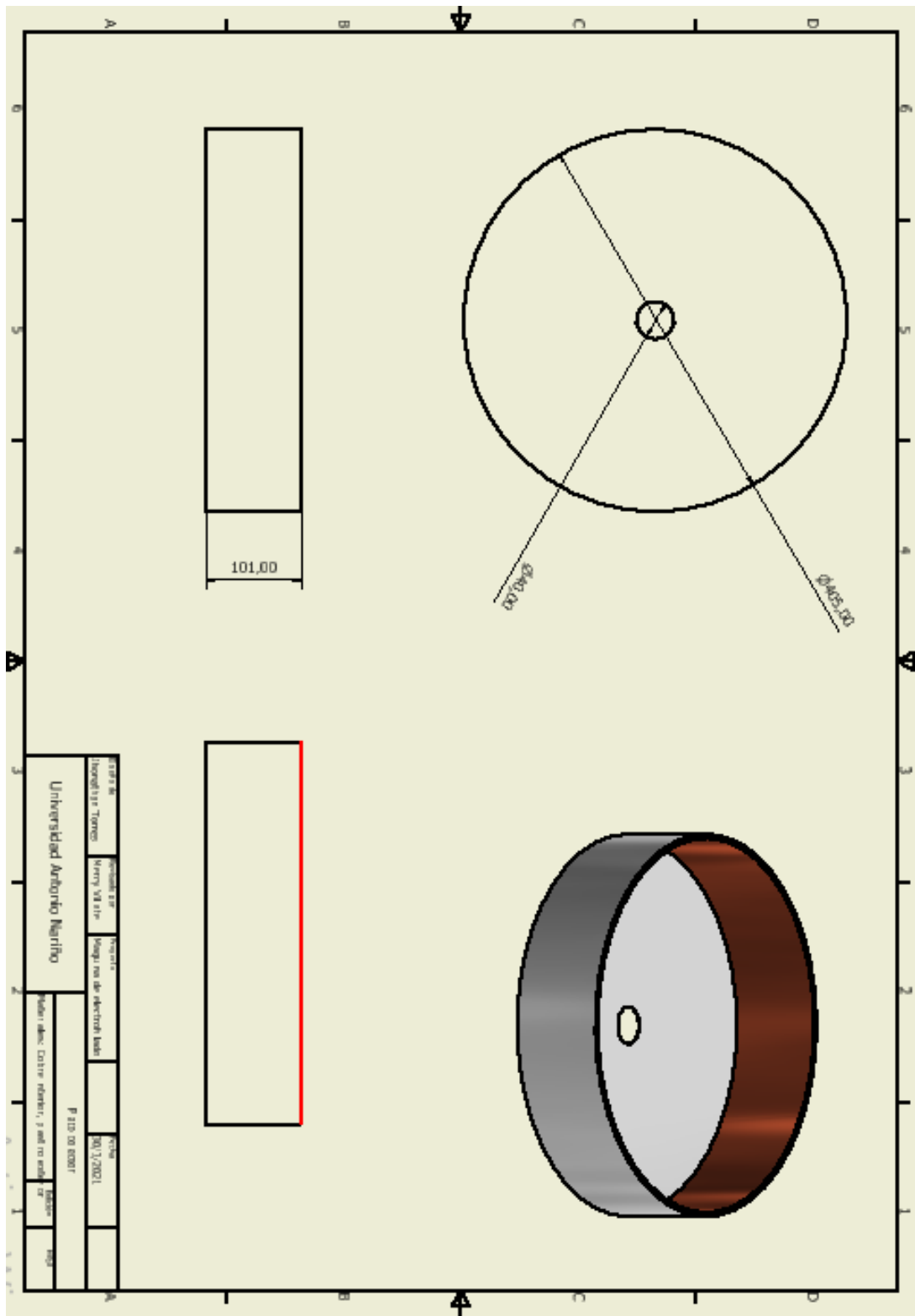
Carcasa



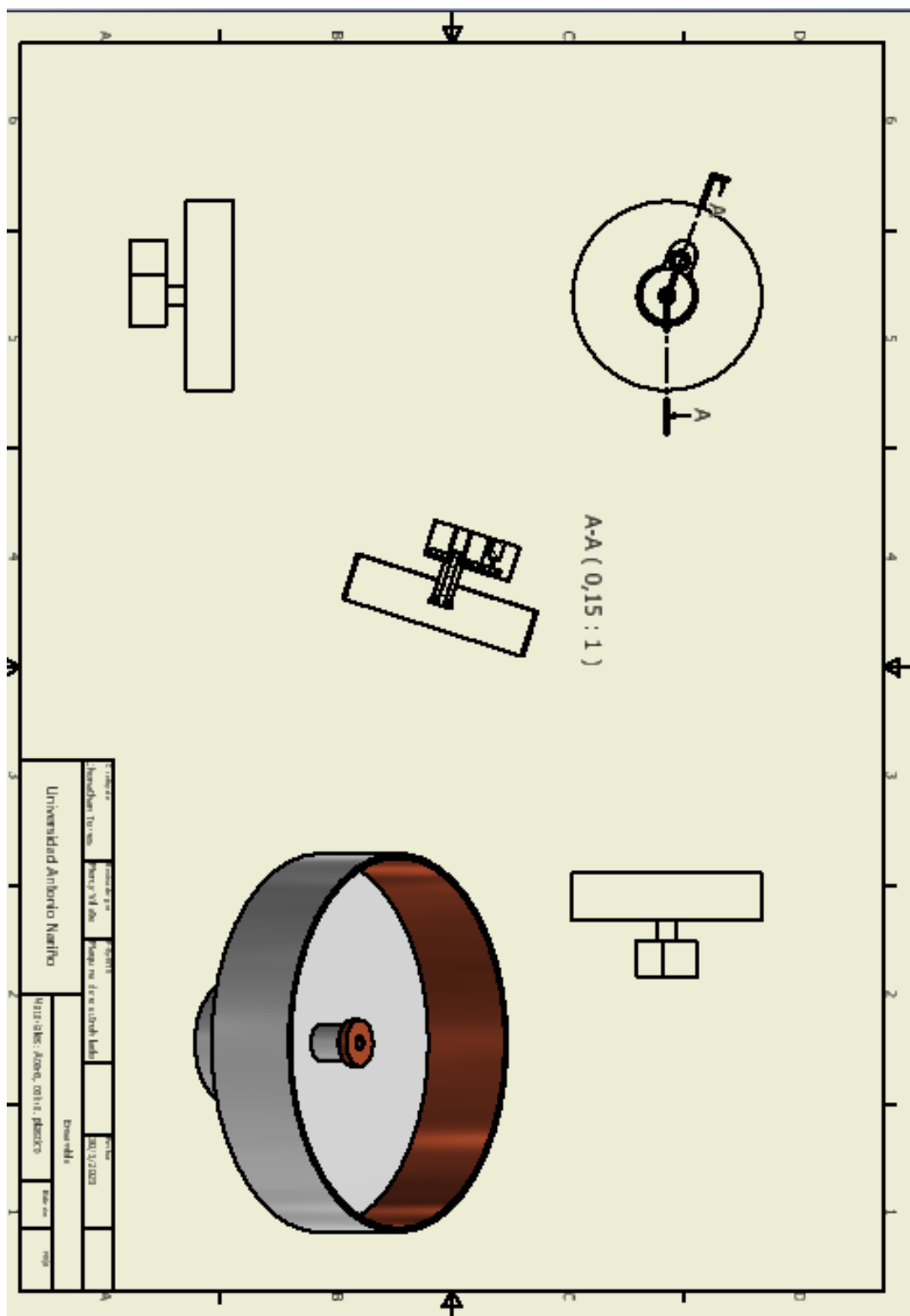
Plato dosificador



Plato colector



Ensamble final



Bibliografía

- Cajero Vázquez, P; Meléndez Lira, M; Camacho López, M. Á; Castillo Rubí, M. A.; González Díaz, F. R. (2010) “Armazones Celulares por la Técnica de Electrohilado” Revista CENIC. Ciencias Químicas, vol. 41, 2010, pp. 1-15 Centro Nacional de Investigaciones Científicas La Habana, Cuba.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181620500011.pdf>
- Calderón Arenas, J.M. y Martínez Rincón H.A. (2012) “Obtención de fibras poliméricas a partir de la técnica de “electrospinning” para aplicaciones biomédicas. Universidad autónoma de occidente, Facultad de ingeniería, departamento de automática y electrónica, programa de ingeniería biomédica. Santiago de Cali, Colombia.
- Can Herrera, L. A. (2017) “Modificación superficial de andamios electrohilado de policaprolactona mediante plasma de aire para su uso potencial en ingeniería de tejidos”. Centro de investigación científico de Yucatán A.C. Mérida, Yucatán 2017.
https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/444/1/PCM_D_Tesis_2017_Can_Luis.pdf
- Castillo Rosales, M. I. (2017) “Evaluación del ácido poliláctico PLA como dosímetro emergente en caso de accidente radiológico”. Universidad mexicana del bicentenario unidad de estudios superiores Lerma.
- Castro Ruiz, A. A. (2018) «Electrohilado coaxial para el desarrollo de membranas a base de poli (acrilonitrilo-butadieno-estireno) y nanopartículas de óxido de zinc: Evaluación de su capacidad para reducción fotocatalítica a Cromo (VI) en agua». Centro de investigación en química aplicada. Tesis, Programa de maestría en tecnología de polímeros. Saltillo, México.
<https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/573/1/Tesis%20MTP%20Angel%20Andr%C3%A9s%20Castro%20Ruiz%2019%20sep%202018.pdf>

- Cattaneo, B. (2019) «Getting specific about nanomaterials», *EU Science Hub - European Commission*, feb. 19, 2019. <https://ec.europa.eu/jrc/en/news/getting-specific-about-nanomaterials> (accedido nov. 08, 2020).
- Chang, Kee Lee, Seon Jeong Kim, Sun I Kim, Byung-Ju Yi and Seog Young Han (2006). Preparation of chitosan microfibres using electro-wet-spinning and their electroactuation properties. Institute of physics. DOI:10.1088/0964-1726/15/2/044. 10.1021/ja068165g.
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/49/072/49072161.pdf
- Chen C.-Y.; J.-W. Zheng, K.-P. Hsu, y C.-L. Chung (2019) «A Hollow Nanostructure of Silicon-Based can be produced by Using Electrospinning process», en 2019 International Conference on Electronics Packaging (ICEP), Niigata, Japan, abr. 2019, pp. 407-410, doi: 10.23919/ICEP.2019.8733522.
- Chitral J., Angamma, Shesha H., Jayaram. (2009) «Effects of electric field on the multi-jet: Electrospinning process and fiber morphology», Mayo, 2009, vol. 3, 1-4 p.).
- Dávila, H. H. y Tobacia, J. C. (2016) «Diseño e implementación de un sistema de control automático para un equipo experimental de electrohilado por centrifugado de nanofibras poliméricas», p. 96. Accedido: may 06, 2020. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/2696/1/TGT_1314.pdf
- Deitzel, J. M., Kleinmeyer, J., Harris, D. E. A., & Tan, N. B. (2001). The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles. *Polymer*, 42(1), 261-272.
- Duque Sánchez, L. M.; Rodríguez, L. y López, M. (2013) «Electrospinning: la era de las nanofibras», *Revista Iberoamericana de polímeros*, Volumen 14(1) p. 18, 2013. <https://studylib.es/doc/6674915/electrospinning--la-era-de-las-nanofibras>
- Electrospinning. (s.f.) *Tu técnica en 1 minuto #1..*
https://www.academia.edu/38450613/Dise%C3%B1o_de_elementos_de_m%C3%A1quinas_pdf
- Electrospinning (s.f) Técnica de electrohilado. Divulgación científica (IQOGCSIC).
<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22289/Capitulo4.pdf>
- Electrohilado por Centrifugado - Búsqueda de Google». https://www.google.com/search?q=ELECTROHILADO+POR+CENTRIFUGADO&source=nms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj4icfdgPjsAhUo2FkKH7oB4kQ_AUoAXoECAQQAw&biw=1366&bih=625#imgrc=X-9-sRAFHBIsSM (accedido nov. 10, 2020).

Gardner Stive. (2005) *Spinning carbon nanotubes (2005)*.

<https://csiropedia.csiro.au/spinning-carbon-nanotubes-2005/>

Gómez Pachón Edwin Yesid, Montiel Campos Raúl, Moreno Rondón Eyleen Vanessa, Vera-Graziano Ricardo (2010). "Diseño de un equipo de electrospinning para la fabricación de andamios de nanofibras para aplicaciones biomédicas". Instituto de Investigación en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, México, D. F.

Herrero Carrión, A. (2015) «Diseño y puesta a punto de una cámara de electrohilado con control de temperatura y humedad ambiental», sep. 2015, Accedido: nov. 08, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/54698>.

Kumar, A. (2010) *Nanofibers*. BoD – Books on Demand. <https://scholar.google.com/citations?user=BMTHWLUAAAJ&hl=es>

Martínez, E. R. B.; Duran O., Prieto E. M., y Gómez E. Y. «Uso de tecnologías utilizadas en el aula para el desarrollo de un sistema de control de posición en los ejes X, Y, Z de un sistema mecatrónico para el proceso de electrohilado de andamios de nanofibras poliméricas», p. 9.

Martínez, y C. L. Del toro-Sánchez (2014) «Aplicaciones biomédicas, textiles y alimentarias de nanoestructuras elaboradas por electrohilado», *Biotecnia*, vol. 16, No 2, p. 44, ago. 2014, doi: 10.18633/bt.v16i2.46

Mott, Robert L. (2006) *Diseños de elementos de Máquina*. Pearson Prentice Hill, México, 4° edición.

Muñoz Noriega, Jesús (2015) *Electrohilado de nanofibras fotosensibles a partir de biopolímeros tipo elastina*. Universidad de Valladolid. Escuela de ingenierías industriales. Valladolid, Junio 2015

<https://docplayer.es/89228180-Electrohilado-de-nanofibras-fotosensibles-a-partir-de-biopolimeros-tipo-elastina.html>

Mastoner.com (2019) "10 Diferencias entre filamento PLA y ABS, ¿Cuál es mejor?", *Blog de mastoner.com*. <https://www.mastoner.com/blog/post/diferencia-entrefilamento-pla-y-abs/> (accedido nov. 08, 2020).

Nanofiber Electrospinning. .

Nano Fiber Double Spinning & Yarning System. .

Nieto D.F.; Largo A.F. y Gómez E.Y. (2017) "Aumento de productividad en la obtención nanofibras poliméricas, mediante validación experimental del proceso de

- electrohilado por centrifugación”. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad Seccional Duitama, Escuela de Diseño Industrial Colombia. Sena, Tercer Simposio de materiales poliméricos. Cali Colombia. Revista: Informador Técnico, volumen 81n2, Suplemento I-2017. <http://revistas.sena.edu.co>
- Nieto D. F., Largo, A. F. y Gómez E. Y. (2018) «Validación del proceso de electrohilado por centrifugación para la obtención de nanofibras poliméricas.», Congreso Internacional y Nacional de Ingeniería Electromecánica, ago. 2018. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja. Accedido: nov. 08, 2020. http://rdigitales.uptc.edu.co/memorias/index.php/ing_electromecanica/ing_electromecanica/paper/view/2654.
- Labnet International (2017) Manual del usuario de centrífuga pdf https://www.labnetinternational.com/sites/www.labnetinternational.com/files/product-documents/LN181000%20C0336%20_ESP.pdf
- Prado Amaro, Franky Asael (2014). Diseño de un minisistema electrospinning. Centro de investigación en ciencia aplicada y tecnología avanzada, ipn. Universidad Tecnológica de Querétaro.
- Reneker D. H. & Chun, I. (1996) «Nanometre diameter fibres of polymer, produced by electrospinning», Nanotechnology, vol. 7, No 3, pp. 216-223, sep. 1996, doi: 10.1088/0957-4484/7/3/009.
- Robles-García, M. A.; R.-F. Francisco, E. Márquez-Ríos, A. Barrera-Rodríguez, J. Aguilar-Martínez, y C. L. Del toro-Sánchez (2014) «Aplicaciones biomédicas, textiles y alimentarias de nanoestructuras elaboradas por electrohilado», biotecnia, vol. 16, No 2, p. 44, ago. 2014, doi: 10.18633/bt.v16i2.46
- Ruiz Santos, Rosalia (2016) *Desarrollo y caracterización de nanocompuesto PVA/HAP por electrohilado y su respuesta biológica*. Centro de investigación de materiales avanzados, S.C. División de estudios de posgrado tesis para obtener el grado de doctor en ciencia en materiales. Chihuahua, chih. 14 de diciembre 2016. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/773/1/rosal%c3%ada%20ru%c3%adz%20santos%20dcm.pdf>
- Ruiz Silva, Eddy Santiago (2019) “Diseño y construcción de una máquina de electrohilado vertical de 0 a 15 KV para generar nanofibras a base del polímero polisiloxano”. Universidad Técnica de Ambato Facultad de ingeniería civil y mecánica, carrera de ingeniería mecánica. Proyecto técnico previo a la obtención del título de ingeniero

mecánico.

Ambato,

Ecuador.

<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/30661>

Serna C. Liliana; Aída Rodríguez de S. Fred Albán A. (2003). Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones Bacteriología, Universidad del Valle. https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/2301

Técnicas de electrohilado, s.f.)

<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22289/Capitulo4.pdf>

The NLI Basic Electrospinning Series: Electrospinning for nanofibers production.

Técnica de electrohilado, Electrospinning. Divulgación científica (IQOGCSIC). .

Wet Spinning of Polyacrylonitrile Fibers. (s.f.)

Zhao Y., X. Cao, y L. Jiang (2007) «Bio-mimic Multichannel Microtubes by a Facile Method», *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 129, No 4, pp. 764-765, ene. 2007, doi: